

Alma Mater Studiorum – Università di Bologna

DOTTORATO DI RICERCA IN  
DISEGNO E METODI DELL'INGEGNERIA INDUSTRIALE

Ciclo XX

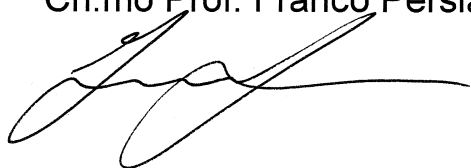
Settore scientifico disciplinare di afferenza: ING-IND/15

**Strumenti e metodi  
per lo sviluppo prodotto  
di lenti oftalmiche**

Dottorando: Gianpaolo Savio

Coordinatore Dottorato

Ch.mo Prof. Franco Persiani



Relatore

Ch.mo Prof. Gianmaria Concheri



Correlatore

Ing. Roberto Meneghello



Esame finale anno 2008



## Abstract

The recent introduction of free form NC machining in the ophthalmic field involved a full review of the former product development process both from the design and the manufacturing viewpoint.

Aim of the present work is to investigate and to set up innovative methods and tools supporting the product development, particularly for lenses characterized by free form geometry, as e.g. progressive lenses.

In the design stage, the research addressed geometric modeling of complex lens shapes and relevant analysis tools for the optical-geometrical characterization of the produced models. In the manufacturing stage, the main interest was focused on the set-up of the fabrication process, particularly on the NC machining process for which an integration CAD-CAM software was developed for the generation and the simulation of the machining cycle.

The methodologies and tools made available by the present work are currently used in the development of new complex geometry product typologies as, e.g. progressive lenses.

**Key words:** *ophthalmic lenses, spectacle lenses, progressive addition lenses, geometric modeling, grinding, polishing, CAD-CAM, surface texture.*





## Sommario

La recente introduzione nel settore oftalmico di macchine a controllo numerico per la lavorazione di geometrie a forma libera ha comportato la revisione del concetto di sviluppo prodotto fino a quel momento vigente, sia dal punto di vista progettuale che dal punto di vista della produzione.

Scopo del presente lavoro è quello di mettere in luce gli strumenti e metodi introdotti a supporto dello sviluppo prodotto, in particolare per quel che riguarda le lenti con geometria a forma libera, quali le lenti a potere progressivo.

Dal punto di vista della progettazione si è intervenuti sia nella modellazione geometrica, sia nello sviluppo di strumenti per la valutazione ottico geometrica dei modelli sviluppati. In fase di produzione il lavoro svolto si è orientato sulla messa a punto del processo produttivo, prestando particolare attenzione alle lavorazioni ad asportazione di truciolo con macchine a controllo numerico, per le quali si è sviluppato un ambiente di integrazione CAD-CAM per la determinazione e la simulazione dei cicli di lavorazione.

Grazie agli strumenti creati è stato possibile sviluppare nuove tipologie di prodotti con geometrie complesse, quali ad esempio quelle delle lenti progressive.

**Parole chiave:** *lenti oftalmiche, lenti progressive, modellazione geometrica, rettifica, lucidatura, CAD-CAM, stato della superficie.*



## **Ringraziamenti**

Si ringraziano IODA srl per aver finanziato l'attività di ricerca svolta durante il dottorato di ricerca e l'Ing. G. Battisti titolare della medesima azienda, il Dipartimento di Architettura Urbanistica e Rilevamento, Laboratorio di Disegno e Metodi dell'Ingegneria Industriale dell'Università degli Studi di Padova, sede operativa dell'attività di ricerca, in particolare il relatore, Prof. Gianmaria Concheri, il correlatore, Ing. Roberto Meneghello, e i colleghi del dipartimento per il contributo fornito nello sviluppo del lavoro, UNILAB laboratori industriali per aver messo a disposizione gli strumenti per la caratterizzazione dello stato superficiale, il Dott. G. Molesini per la collaborazione nello sviluppo del software per il ray tracing.



# Indice

Abstract .....	3
Sommario .....	5
Ringraziamenti .....	7
Indice .....	9
Introduzione .....	13
Capitolo I Sviluppo prodotto nel settore oftalmico .....	17
I.1 Il ciclo di vita del prodotto .....	18
I.2 Tecnologie impiegate nella realizzazione di lenti oftalmiche .....	19
I.3 Sviluppo prodotto nel settore oftalmico .....	22
Capitolo II Progettazione e modellazione di superfici ottiche .....	25
II.1 Principi di ottica geometrica e oftalmica .....	26
II.1.1 Tipologie di lenti oftalmiche .....	29
II.2 Progettazione delle lenti oftalmiche .....	37
II.3 Modellazione geometrica di lenti atoriche .....	38
II.4 Modellazione geometrica di lenti progressive .....	39
II.4.1 Stato dell'arte .....	39
II.4.2 Metodologie sviluppate .....	40
Capitolo III Sviluppo di strumenti per l'analisi dei modelli geometrici .....	45
III.1 Valutazione della curvatura per l'analisi ottica .....	46
III.1.1 Curvatura di curve e superfici analitiche [25] .....	46
III.1.2 Metodologie per l'analisi di curvatura di curve e superfici discretizzate .....	48
III.1.3 Sviluppo di strumenti per l'analisi della curvatura di profili definiti da nuvole di punti .....	50
III.1.4 Sviluppo di strumenti per l'analisi della curvatura di superfici definite da nuvole di punti .....	55
III.1.5 Stima delle proprietà ottiche attraverso l'analisi di curvatura .....	60
III.2 Ray tracing .....	62

III.2.1	Struttura degli algoritmi sviluppati per la valutazione delle proprietà ottiche	64
Capitolo IV Sviluppo di un ambiente CAM per la lavorazione		73
IV.1	Le macchine a controllo numerico	74
IV.1.1	La rettificatrice ASM 100 CNC	74
IV.1.2	La lucidatrice ASP 200 CNC	76
IV.1.3	La lucidatrice SPF 80 CNC	77
IV.2	Sviluppo dell'ambiente di integrazione CAD-CAM	78
IV.2.1	Analisi delle criticità	78
IV.2.2	Il progetto dell'ambiente <i>V-Lens</i>	79
IV.2.3	Struttura dell'ambiente sviluppato	81
Capitolo V Caratterizzazione del processo produttivo		101
V.1	Tipologie di processi per la produzione di lenti	102
V.2	Il processo produttivo indagato	102
V.3	Rettifica	104
V.3.1	Cenni sullo stato dell'arte	104
V.3.2	Dinamica della lavorazione	110
V.3.3	Modelli della lavorazione	113
V.3.4	Valutazioni sperimentali	115
V.4	Lucidatura	126
V.4.1	Cenni sullo stato dell'arte	126
V.4.2	Dinamica della lavorazione	130
V.4.3	Modelli della lavorazione	136
V.4.4	Valutazioni sperimentali	140
V.5	Linee guida per la scelta dei parametri di lavorazione	153
Capitolo VI Prototipazione e analisi di modelli fisici		155
VI.1	Lenti semifinite e lenti finite non tagliate	156
VI.2	Lenti progressive progettate	156
VI.3	Prototipi di lenti progressive	161
Conclusioni		165

Appendice I Caratteristiche tecniche della strumentazione impiegata .....	167
I.1 AFM.....	167
I.2 Rugosimetro – Profilometro .....	168
ASM 100 CNC.....	169
I.3 SPF 80 CNC .....	170
I.4 ASP 200 CNC.....	171
I.5 Class Pluss .....	173
Appendice II Elenco pubblicazioni e tesi seguite .....	175
II.1 Pubblicazioni su rivista internazionale.....	175
II.2 Pubblicazioni su convegni internazionali.....	175
II.3 Pubblicazioni su convegni nazionali .....	176
II.4 Pubblicazioni divulgative .....	176
II.5 Tesi seguite in veste di correlatore .....	176
Bibliografia .....	179





## Introduzione

Nello sviluppo di un qual si voglia prodotto, una volta individuato il bisogno da soddisfare e definite le funzioni alle quali il prodotto deve assolvere, prima di procedere alla progettazione bisogna aver identificato in modo chiaro i sistemi di concretizzazione della funzione, come proposto nei metodi di progettazione metodica. Tali sistemi di concretizzazione sono strettamente legati alla tecnologia che si decide di impiegare per la realizzazione del prodotto, la cui scelta implica la definizione delle fasi e delle attività che conducono allo sviluppo del prodotto sia da un punto di vista progettuale che dal punto di vista della messa a punto e pianificazione del processo produttivo.

L'attività di ricerca e sviluppo descritta in questo documento, è volta ad illustrare le implicazioni legate all'introduzione di nuove tecnologie, basate su lavorazioni ad asportazione di truciolo con macchine a controllo numerico per la realizzazione di superfici a forma libera, nello sviluppo prodotto di lenti oftalmiche. Più specificatamente si andranno a mettere in luce gli aspetti relativi alla progettazione e alla messa a punto del processo produttivo sui quali si è contribuito, con particolare riferimento alle lenti progressive.

Dall'analisi del processo produttivo scelto è stato possibile individuare un insieme di fasi ed attività per la pianificazione della progettazione e la messa a punto del processo produttivo stesso; nella progettazione in particolare sono state individuate e sviluppate alcune strategie per la modellazione geometrica e per l'analisi ottico-geometrica dei modelli virtuali, mentre nella messa a punto del processo produttivo è stato sviluppato un ambiente di integrazione CAD-CAM per la determinazione e la simulazione dei cicli di lavorazione, e si è proceduto ad una caratterizzazione dello stato superficiale, dal punto di vista micro e macrogeometrico, delle lavorazioni di rettifica e di lucidatura, in funzione dei parametri del ciclo di lavorazione, dei materiali e delle caratteristiche cinematiche e di rigidità delle macchine a controllo numerico impiegate. Tutto questo ha dato la possibilità di sviluppare ed analizzare alcuni prototipi di lenti progressive che sono ancora in fase di valutazione presso laboratori ottici. Quanto appena detto è riassunto nel primo capitolo e sviluppato in quelli successivi.

Nel secondo capitolo, dopo una breve introduzione inerente all'ottica geometrica ed oftalmica e alle principali tipologie di lenti per occhiali da vista, viene data una descrizione sommaria del processo di progettazione della lente, sviluppando successivamente le strategie di modellazione geometrica delle lenti toriche e progressive; in quest'ultimo caso si sono sviluppate due distinte strategie, la prima basata sull'impiego di uno strumento software commerciale per la modellazione di superfici, la seconda orientata sull'impiego di algoritmi specifici per la definizione di un modello geometrico definito da una nuvola di punti.

Individuate le strategie per la modellazione geometrica delle lenti, è stato necessario sviluppare degli strumenti software che hanno consentito di valutare le proprietà ottico geometriche delle lenti sviluppate. Nel terzo capitolo vengono descritti i citati strumenti basati sull'analisi delle curvature della singola superficie, che attraverso opportune relazioni possono essere ricondotte alle proprietà ottiche della medesima, e sul ray tracing, che consente la valutazione delle proprietà ottiche del sistema occhio-lente, nonché un'ottimizzazione della geometria della lente medesima.

Nel quarto capitolo, dopo una descrizione delle macchine a controllo numerico impiegate in rettifica e in lucidatura, si espone la progettazione e lo sviluppo di un ambiente per di calcolo e simulazione dei cicli di lavorazione che impiega come modelli geometrici di partenza superfici definite da mesh poliedriche o da nuvole di punti.

Una descrizione più approfondita della dinamica delle lavorazioni di lucidatura e rettifica viene fornita nel capitolo successivo, dove vengono affrontate le problematiche relative alle lavorazioni ad asportazione di materiale da un punto di vista tecnologico. In questo contesto si è andato ad indagare lo stato superficiale ottenuto nelle lavorazioni a seconda dei parametri relativi al ciclo di lavorazione; in particolare il problema è stato affrontato da un lato con un approccio simile a quello proposto in normativa scomponendo il profilo acquisito in profilo primario, profilo di rugosità e profilo di ondulazione, dall'altro andando a sviluppare modelli che consentissero di prevedere l'errore micro e macrogeometrico legato ai parametri di lavorazione.

Infine nel capitolo VI si propongono i modelli di lenti progressive progettati, alcuni dei quali sono stati successivamente prototipati ed analizzati con strumentazione ottica, ed uno dei quali è stato oggetto di brevettazione. I risultati delle misurazioni ottiche hanno dimostrato

la validità degli strumenti sviluppati, in quanto le caratteristiche ottiche ottenute rispecchiano, entro i limiti di tolleranza previsti dalla normativa, le specifiche ottiche nominali impiegate in fase di progettazione.



# **Capitolo I**

## **Sviluppo prodotto nel settore oftalmico**

Molto spesso una lente oftalmica è ottenuta grazie all'impiego di diverse tecnologie; le più impiegate sono basate sullo stampaggio, sul casting, sull'incollaggio di diversi componenti o su lavorazioni ad asportazione di truciolo. In quest'ultimo caso, l'introduzione di tecnologie per la lavorazione di superfici a forma libera attraverso macchine a controllo numerico di rettifica e lucidatura, ha indotto un riesame del processo di sviluppo prodotto nel settore. Infatti, l'impiego di queste tecniche di produzione porta con sé una rivoluzione del processo di progettazione per il quale è stato necessario mettere a punto strategie per la modellazione geometrica delle superfici e per l'analisi delle stesse, nonché del processo produttivo per il quale è stata necessaria la messa a punto.

In questo contesto, si vogliono evidenziare le criticità nate dall'inserimento di una nuova tecnologia produttiva, mettendo in luce gli aspetti sui quali è stato necessario apportare nuove conoscenze e sviluppare strumenti che consentano di sfruttarne al meglio i vantaggi della stessa.

## ***1.1 Il ciclo di vita del prodotto***

Per ciclo di vita del prodotto si intende tipicamente un insieme di fasi e attività che, partendo dall'individuazione di un bisogno, portano a sviluppare, produrre, vendere e smaltire un prodotto.

In letteratura sono riportate diverse schematizzazioni del tutto generali delle fasi che costituiscono il ciclo di vita del prodotto, che mettono in evidenza prevalentemente aspetti di tipo economico o ingegneristico. Un tipico esempio del tutto generico può essere rilevato nella ISO 9004-1 [1] la quale individua le seguenti fasi tipiche del ciclo di vita del prodotto:

- ricerca e studio di mercato,
- concezione e sviluppo prodotto,
- preparazione e sviluppo dei processi,
- approvvigionamenti,
- produzione o fornitura di servizi,
- verifica,
- imballaggio e stoccaggio,
- vendite e distribuzione,
- installazione e attivazione,
- assistenza tecnica e riparazione, post vendita,
- momento in cui il prodotto viene gettato nei rifiuti o riciclato al termine del ciclo di vita.

Da un altro punto di vista è possibile rivedere questa schematizzazione, come proposto da K. Lee [2], mettendo in evidenza gli aspetti relativi alla progettazione e alla produzione di un oggetto ed identificando gli strumenti computer aided utili alle varie fasi della gestione del ciclo di vita del prodotto. In particolare, in fase di progettazione, partendo dall'identificazione di un bisogno è possibile giungere alla definizione delle specifiche di progetto e di conseguenza passare ad uno studio di fattibilità; successivamente si procede alla concettualizzazione del prodotto e all'analisi del progetto preliminare. A questo punto si passa

alla progettazione di dettaglio, all'analisi, all'ottimizzazione e alla valutazione del prodotto "virtuale", ottenendo alla fine la documentazione del progetto. È quindi possibile procedere alla pianificazione del processo e della produzione, provvedendo alla messa a punto delle tecnologie necessarie per la realizzazione del prodotto, e quindi giungere alla produzione, al controllo qualità, all'imballaggio, alla spedizione e alla vendita.

Per quanto riguarda la progettazione in letteratura vengono proposti varie strategie che conducono al progetto di dettaglio attraverso passi quali la concettualizzazione, la sintesi, l'analisi e l'ottimizzazione [3], [4].

In ogni caso schematizzazioni di questo genere possono essere utili alla strutturazione dell'attività di sviluppo prodotto, ma devono essere comunque trasferite all'applicazione effettiva, tenendo in considerazione aspetti più dettagliati che prendano in considerazione le tipologie di processo produttivo utilizzabili.

## ***1.2 Tecnologie impiegate nella realizzazione di lenti oftalmiche***

A livello industriale è possibile individuare una serie di tecnologie che vengono ordinariamente impiegate per la realizzazione di lenti [5]; in particolare, nel settore oftalmico, i metodi di fabbricazione utilizzati per la realizzazione di lenti finite non tagliate, prescindendo dai trattamenti superficiali, possono essere classificati in quattro tipologie principali [6], [7]:

1. il casting, dove la lente finita o semifinita è prodotta impiegando un materiale grezzo che modifica le sue caratteristiche chimiche passando dallo stato liquido allo stato solido all'interno di uno stampo, come nel caso della polimerizzazione del CR39;
2. lo stampaggio, dove il materiale viene deformato dalla pressione applicata, ottenendo una lente finita o semifinita, come avviene nell'injection moulding del policarbonato.
3. i multi-part systems, dove due o più pezzi sono uniti per ottenere la lente finita (ad esempio le lenti bifocali)
4. metodi per asportazione di truciolo, nel quale il materiale della lente viene tornito, rettificato o fresato, e successivamente lucidato.

Molto spesso le lenti sono ottenute da una combinazione dei processi descritti come avviene spesso nel caso delle lenti in CR39, dove si ottiene da prima una lente semifinita con il processo di casting, e successivamente la seconda superficie viene lavorata in un laboratorio di ricettazione.

Il metodo più comune impiegato ad oggi per la realizzazione di lenti oftalmiche è il casting; esso consiste nell'inserire un elemento (ad esempio CR39 allo stato di monomero) tra due stampi, tipicamente in vetro, tenuti insieme da una guarnizione flessibile e da una molla (figura 1), e di sottoporre il tutto ad un trattamento termico di polimerizzazione, che avviene grazie alla presenza di un catalizzatore, per circa 18 ore.



**Figura 1 Componenti impiegati nella produzione di lenti mediante casting: stampi, guarnizione flessibile e molla.**

Durante in processo di polimerizzazione il materiale riduce il suo volume di circa il 14%; metà di tale riduzione avviene mentre il monomero è ancora liquido ed è per questo che si rende necessario un anello elastico di contenimento del liquido. Questa tecnologia non si rivela appropriata nel caso di lenti ad elevato potere, in quanto la grossa differenza tra spessore al bordo e spessore al centro può causare la separazione tra lo stampo e la lente, quando il materiale solidifica e continua a ridurre le sue dimensioni.

Il casting è tipicamente usato nella produzione di massa o nella produzione di lenti semifinite, ma non per lenti su prescrizione, in quanto gli scarti di produzione aumentano esponenzialmente con il potere richiesto dalla prescrizione.

Lo stampaggio è un processo comunemente usato per la lavorazione delle lenti in polycarbonato. Il processo consiste nel produrre una polvere di polycarbonato che viene riscaldata e iniettata sotto pressione nella cavità dello stampo. Come nel casting è difficile



produrre lenti ad alto potere in quanto, quando si raffredda la lente, vengono a presentarsi variazioni di volume.

Un'altra tecnica di stampaggio è lo slumping (figura 2), tipicamente impiegato per la realizzazione di lenti progressive semifinite o di stampi in vetro. Un materiale ceramico viene lavorato con una rettifica a controllo numerico sulla superficie superiore con la forma di una lente progressiva e successivamente si dispone sopra al ceramico una lente in vetro di spessore costante. Il tutto viene riscaldato ad una temperatura tale che consenta al vetro di piegarsi senza sciogliersi. Successivamente la lente viene inviata in un laboratorio di ricettazione per essere lavorata sulla superficie opposta.



**Figura 2 Schematizzazione del processo di slumping.**

I processi multi-part tipicamente impiegati per la produzione di lenti bifocali sono molto diversificati. Il processo più conosciuto consiste nel togliere alla lente una parte e sostituirla con un tassello ad indice di rifrazione o a curvatura differente, in modo da ottenere l'addizione di potere necessaria per la visione da vicino.

Nel caso di produzione di lenti su ricettazione il sistema più comunemente impiegato è l'asportazione di truciolo. Esistono tre tipologie principali di lavorazioni; la prima è basata sulla lavorazione di blocchi di lenti, tipicamente in vetro, mediante rettifica con mole a tazza e successiva lucidatura; la seconda consiste nel lavorare una lente semifinita in vetro o resina ottenendo le caratteristiche ottiche desiderate tramite una lavorazione di geometria sferica o torica; la terza, tecnologia di recente introduzione che sta sempre più prendendo piede, consiste nell'impiegare macchine per la lavorazione di superfici con geometria a forma libera quali torni, frese, rettifiche e lucidatrici. In figura 3 è rappresentata ad esempio una lavorazione di tornitura di una lente in materiale organico. A seconda della loro specifica configurazione, queste macchine consentono lavorazioni di lenti o stampi in vetro e di lenti in resina.

Il processo produttivo attuato nell'azienda in esame si basa essenzialmente sulla produzione di lenti finite e semifinite in resina con tecniche di casting, realizzate con stampi in vetro ottenuti con le tecnologie ad asportazione di truciolo per superfici a forma libera. Con tali tecnologie è inoltre possibile realizzare lenti in vetro per applicazioni particolari.



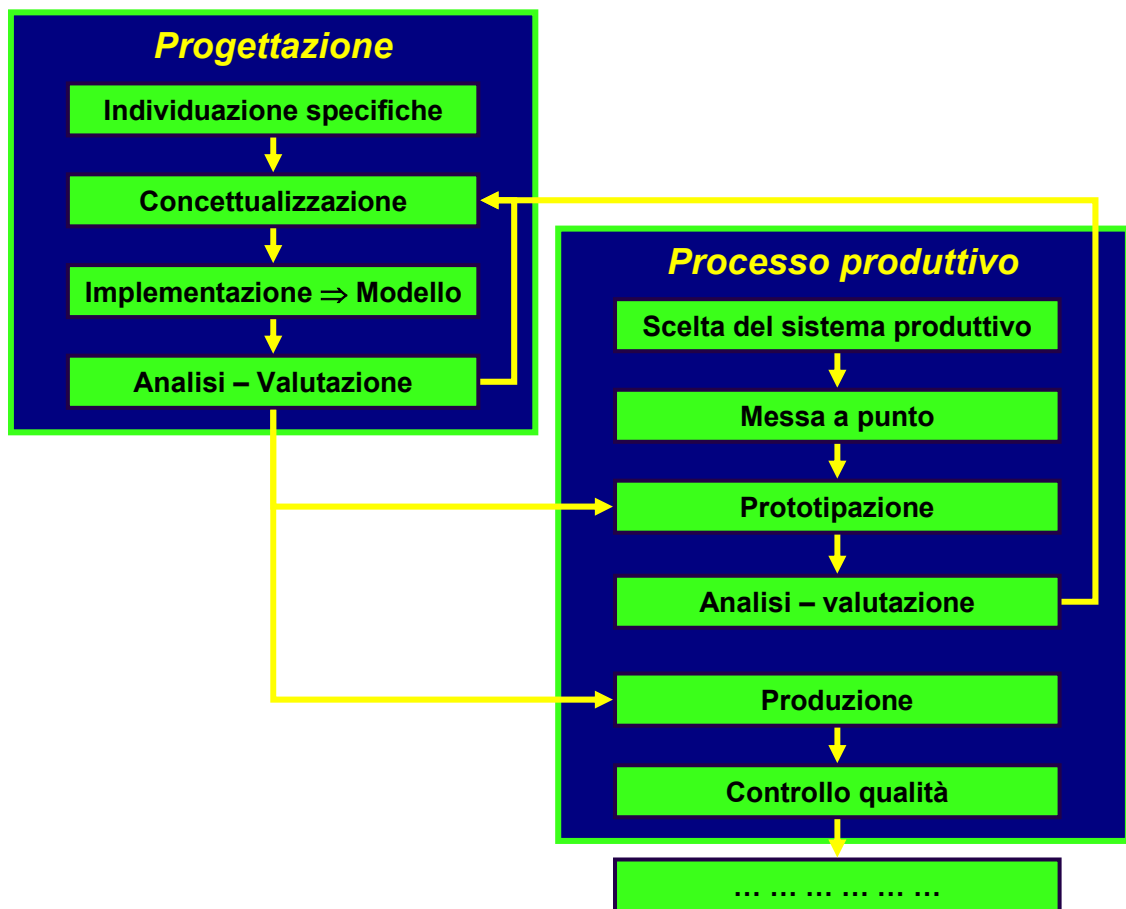
**Figura 3 Tornitura di una lente oftalmica in resina.**

L'introduzione della tecnologia per la realizzazione di superfici a forma libera nel settore delle lenti oftalmiche ha dato la motivazione per andare a ridefinire il processo di sviluppo prodotto della lente, argomento della presente tesi.

### ***1.3 Sviluppo prodotto nel settore oftalmico***

Il desiderio da parte dell'azienda di produrre lenti con geometria a forma libera, quali le lenti progressive, ha portato all'introduzione nel processo produttivo di macchine a controllo numerico di rettifica e di lucidatura.

La conseguenza di questo mutamento nel processo produttivo è stata la revisione completa del concetto di sviluppo prodotto presente in azienda. Tale revisione è stata fatta prendendo spunto dalla letteratura, in parte presentata nel paragrafo I.1, e può essere schematizzata come rappresentato in figura 4.



**Figura 4 Diagramma di flusso schematico delle principali attività di sviluppo prodotto nel settore oftalmico.**

L'esigenza di sviluppare una lente di tipo progressivo nasce dalla necessità di individuare una soluzione alla presbiopia, patologia tipica in soggetti sopra i quarant'anni di età che porta ad una perdita progressiva di elasticità del cristallino e conseguentemente all'incapacità di mettere a fuoco oggetti vicini.

Esistono altre soluzioni per la correzione della presbiopia quali interventi chirurgici, l'impiego di lenti a contatto e l'impiego di lenti bifocali, ma queste soluzioni risultano spesso insoddisfacenti dal punto di vista della qualità visiva o della sicurezza del risultato.

Nel presente lavoro vengono presentati gli aspetti sui quali si è contribuito nelle fasi di progettazione e di produzione delle lenti con riferimento particolare alle lenti progressive.

In particolare, nella fase di progettazione, partendo dalle specifiche ottiche richieste si sono proposti due distinti metodi per la modellazione geometrica della lente, uno basato

sull'impiego di un ambiente CAD, l'altro fondato sullo sviluppo di algoritmi per la definizione della superficie come nuvola di punti. Per la valutazione dei modelli sono stati sviluppati strumenti software per la valutazione delle caratteristiche ottico-geometriche che utilizzano tecniche di analisi di curvatura e di ray tracing.

Nella fase relativa alla produzione, definito il processo produttivo, è stato necessario da principio lo sviluppo di un ambiente di integrazione CAD-CAM che consentisse la conversione del modello geometrico nel percorso utensile delle macchine e garantisse la possibilità di simulare le lavorazioni ove non incorrere in danneggiamenti delle macchine utensile. Il carattere prototipale delle macchine impiegate ha inoltre costretto ad una caratterizzazione tecnologica dello stato superficiale ottenuto dalla lavorazione, sia da un punto di vista dell'errore geometrico che dal punto di vista della rugosità superficiale, portando all'individuazione di set di parametri di lavorazione in funzione della geometria degli utensili e della geometria della lente da lavorare.

Dopo aver effettuato la messa a punto del processo si procede alla realizzazione, analisi e valutazione di alcuni prototipi, dai risultati delle quali è possibile evincere la bontà del progetto proposto. Nei capitoli successivi verranno esposte più dettagliatamente le varie fasi, qui descritte sommariamente, sulle quali si è apportato un intervento significativo nello sviluppo prodotto.

## **Capitolo II**

### **Progettazione e modellazione di superfici ottiche**

L'ottica oftalmica può essere ritenuta un'applicazione dell'ottica geometrica, alla quale si devono aggiungere una serie di nozioni specifiche legate alla fisiologia e alle patologie dell'apparato visivo, nonché a convenzioni usate nella prescrizione e nella misurazione di una lente oftalmica.

La progettazione di una lente oftalmica è basata proprio su concetti che si possono ritrovare nell'ottica geometrica classica, ma che devono tenere in considerazione anche l'ametropia dell'apparato visivo, e quindi del principio di compensazione, secondo il quale il compito della lente altro non è che quello di riportare l'immagine di un oggetto in un punto che l'occhio riesce a mettere a fuoco.

Partendo da questi presupposti, si dà dapprima un quadro generale delle geometrie delle lenti e dei metodi di progettazione, e successivamente si propongono nuove strategie di modellazione geometrica, sviluppate per sfruttare le tecnologie per la realizzazione di superfici a forma libera introdotte recentemente. Da questo punto di vista rivestono un ruolo rilevante la modellazione geometrica delle lenti progressive.

## II.1 Principi di ottica geometrica e oftalmica

Per lo studio del comportamento ottico di una lente si ricorre solitamente all'ottica geometrica, la cui principale legge, detta legge di Snell [8], stabilisce che il rapporto tra il seno dell'angolo di incidenza e il seno dell'angolo di rifrazione, è uguale al rapporto tra gli indici di rifrazione  $n_2$  e  $n_1$  del mezzo contenente il raggio riflesso e del mezzo contenente il raggio incidente:

$$(1) \quad \sin(\theta_1)/\sin(\theta_2) = n_2/n_1.$$

Tale legge può essere espressa in forma vettoriale [9]:

$$(2) \quad n_1 \vec{r}_1 \times \vec{a} = n_2 \vec{r}_2 \times \vec{a},$$

dove  $\vec{r}_1$  il versore del raggio incidente,  $\vec{r}_2$  il versore del raggio rifratto,  $\vec{a}$  la normale alla superficie nel punto di intersezione (figura 5).

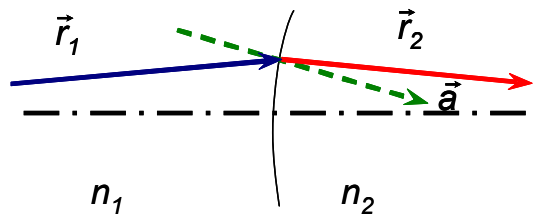


Figura 5 Legge di snell in forma vettoriale.

A causa della complessità del tracciamento esatto dei raggi, sono state introdotte una serie di approssimazioni come, considerare la lente sottile, l'approssimazione parassiale e successivamente la teoria del terzo ordine, nelle quali le funzioni trigonometriche sono rispettivamente considerate lineari o sviluppate in serie di Taylor fino al terzo ordine (aberrazioni di Seidel [10]).

Oltre alle tecniche standard di valutazione delle proprietà ottiche è possibile ricorrere al ray tracing. Se si considera il tracciamento esatto dei raggi, ottenuto applicando la legge di Snell in forma vettoriale, si nota che ad un punto oggetto non corrisponde un unico punto immagine, cioè i raggi che partono dal punto oggetto, attraversando il sistema ottico e il suo diaframma, non convergono in un unico punto, ma in una zona ristretta. Per identificare la

posizione dell'immagine è necessario definire la macchia di confusione o spot diagram (vedi figura 40). Essa rappresenta l'intersezione tra i raggi tracciati, da un punto oggetto o dall'infinito che attraversano il sistema ottico e il suo diaframma, e un piano parallelo al diaframma del sistema ottico stesso [11]. Tipicamente la macchia di confusione è caratterizzata da tre parametri che servono per definire la qualità dell'immagine: l'estensione massima, l'estensione media e l'asimmetria [12]. La posizione dell'immagine sarà allora definita da quel piano parallelo al diaframma nel quale la macchia di confusione presenta la dimensione minima. Nota che sia la posizione dell'immagine si potrà stabilire il potere frontale posteriore della lente come reciproco della distanza tra l'immagine e la superficie posteriore della lente. Attraverso il ray tracing come si vedrà nel capitolo successivo è possibile, oltre che analizzare le superfici, giungere a un criterio di ottimizzazione dei coefficienti di asfericità delle superfici strumento utile per la progettazione.

Tipicamente in ottica oftalmica il potere della lente è misurato rispetto alla sua superficie posteriore, in quanto tale è la grandezza che viene misurata dagli strumenti di misura quali i frontofocometri.

In un sistema ottico centrato il potere frontale posteriore può essere determinato con ottima approssimazione partendo dallo spessore  $t$ , dall'indice di rifrazione  $n$  e dai raggi di curvatura delle superfici anteriore  $R_f$  e posteriore  $R_b$ :

$$(3) \quad P_v = P_f / (1 - (t/n)P_f) + P_b,$$

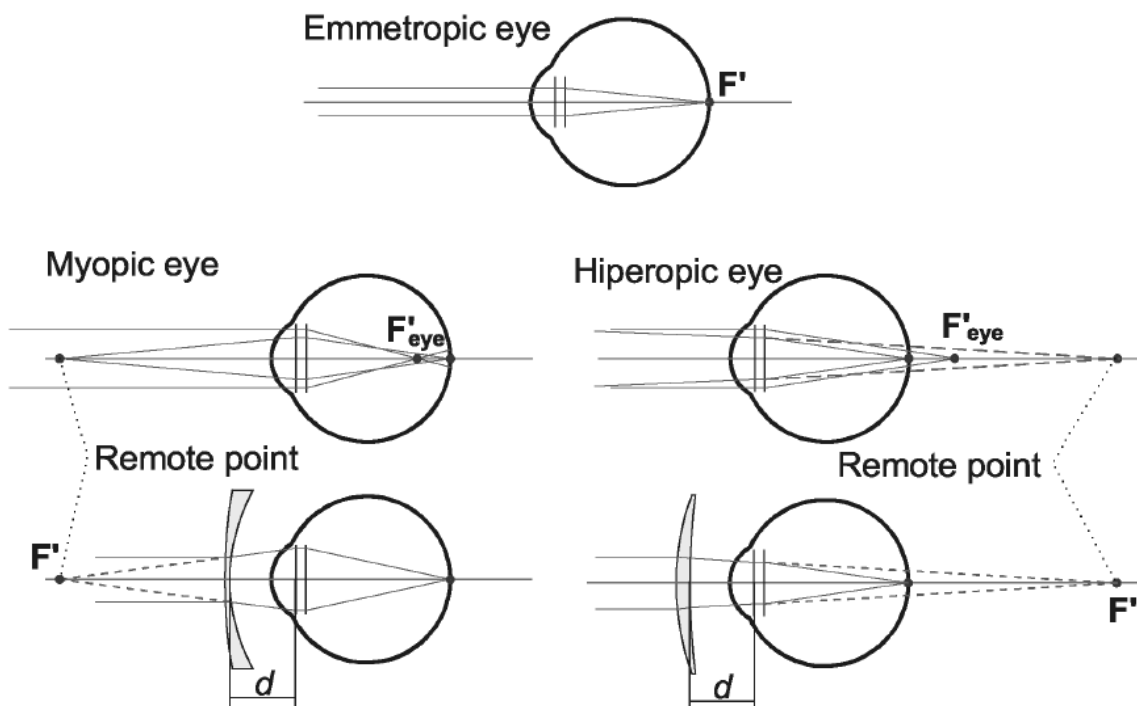
$$(4) \quad P_f = \frac{(n-1)}{R_f},$$

$$(5) \quad P_b = \frac{(n-1)}{R_b},$$

dove  $P_f$  e  $P_b$  sono rispettivamente il potere della superficie anteriore e posteriore e  $t$  è lo spessore al centro.

Per un occhio emmetrope un punto posto all'infinito focalizzato sulla retina. Grazie al meccanismo di accomodazione del cristallino, l'occhio riesce inoltre a mettere a fuoco sulla fovea anche un punto vicino (o un immagine vicina).

In un occhio ametropico questo non avviene. Le principali patologie che causano questo problema sono la miopia e l'ipermetropia [13]; nel primo caso un oggetto lontano viene focalizzato prima della fovea, mentre nel secondo l'immagine viene focalizzata dietro alla fovea. In questi casi si definisce punto remoto quel punto che l'occhio riesce a focalizzare in condizione di rilassamento del cristallino, condizione tipica della visione di un oggetto lontano. Analogamente si definisce punto prossimo quel punto che l'occhio riesce a mettere a fuoco, in condizioni di completa contrazione del cristallino. Il compito che deve svolgere una lente oftalmica è quello di riportare l'immagine dell'oggetto lontano nel punto remoto e l'immagine dell'oggetto vicino nel punto prossimo: tale principio passa sotto il nome di principio di compensazione (figura 6) [14]. Nel rispetto di tale principio una lente per la correzione della miopia dovrà essere negativa (presentare cioè un potere negativo ed essere quindi più sottile al centro), mentre una lente per la correzione dell'ipermetropia dovrà essere positiva (cioè dovrà avere un potere positivo e quindi uno spessore al centro maggiore di quello al bordo).



**Figura 6** Illustrazione delle principali ametropie e del principio di compensazione.



Altre patologie tipiche dell'occhio, che possono essere corrette con lenti oftalmiche, sono l'astigmatismo, nel quale raggi paralleli provenienti da lontano appartenenti a piani diversi non convergono su un medesimo punto, e la presbiopia che consiste in una graduale diminuzione dell'elasticità del cristallino e quindi l'incapacità di mettere a fuoco oggetti sia vicini che lontani. Nel caso dell'astigmatismo è possibile ricorrere all'impiego di lenti toriche, mentre nel caso della presbiopia è possibile impiegare due occhiali distinti, oppure, ricorrere a lenti multifocali o a potere progressivo.

Esistono poi una serie di altre patologie dell'occhio che possono essere corrette con lenti speciali; tali patologie sono tipicamente dette di tipo refrattivo, cioè legate a problemi di rifrazione e quindi di "geometria" dell'occhio. Negli altri casi di malattie dell'apparato visivo è necessario ricorrere a interventi chirurgici o farmaceutici.

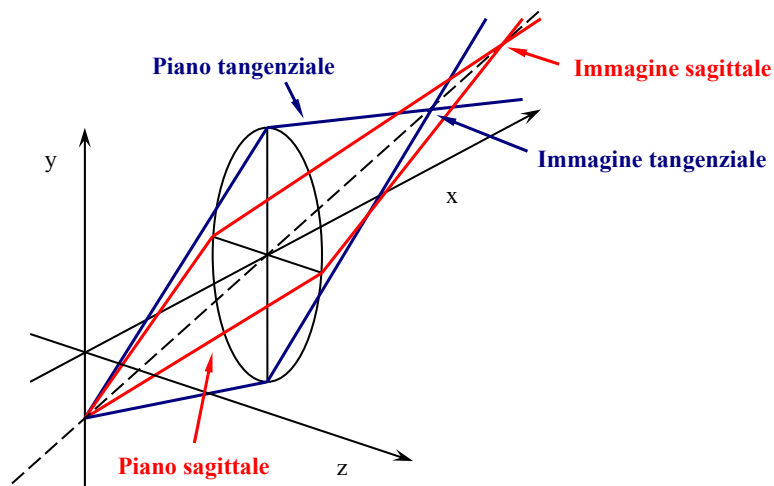
### II.1.1 Tipologie di lenti oftalmiche

Esistono svariati metodi per classificare le lenti oftalmiche: si può pensare di seguirne la loro evoluzione storica, classificarle in base ad aspetti tecnologici quali i materiali impiegati per la loro realizzazione o il tipo di processo produttivo impiegato, o ad esempio in base alla loro geometria. In questo contesto si ritiene utile darne una classificazione dal punto di vista geometrico riportando alcuni cenni per quel che riguarda la loro evoluzione storica.

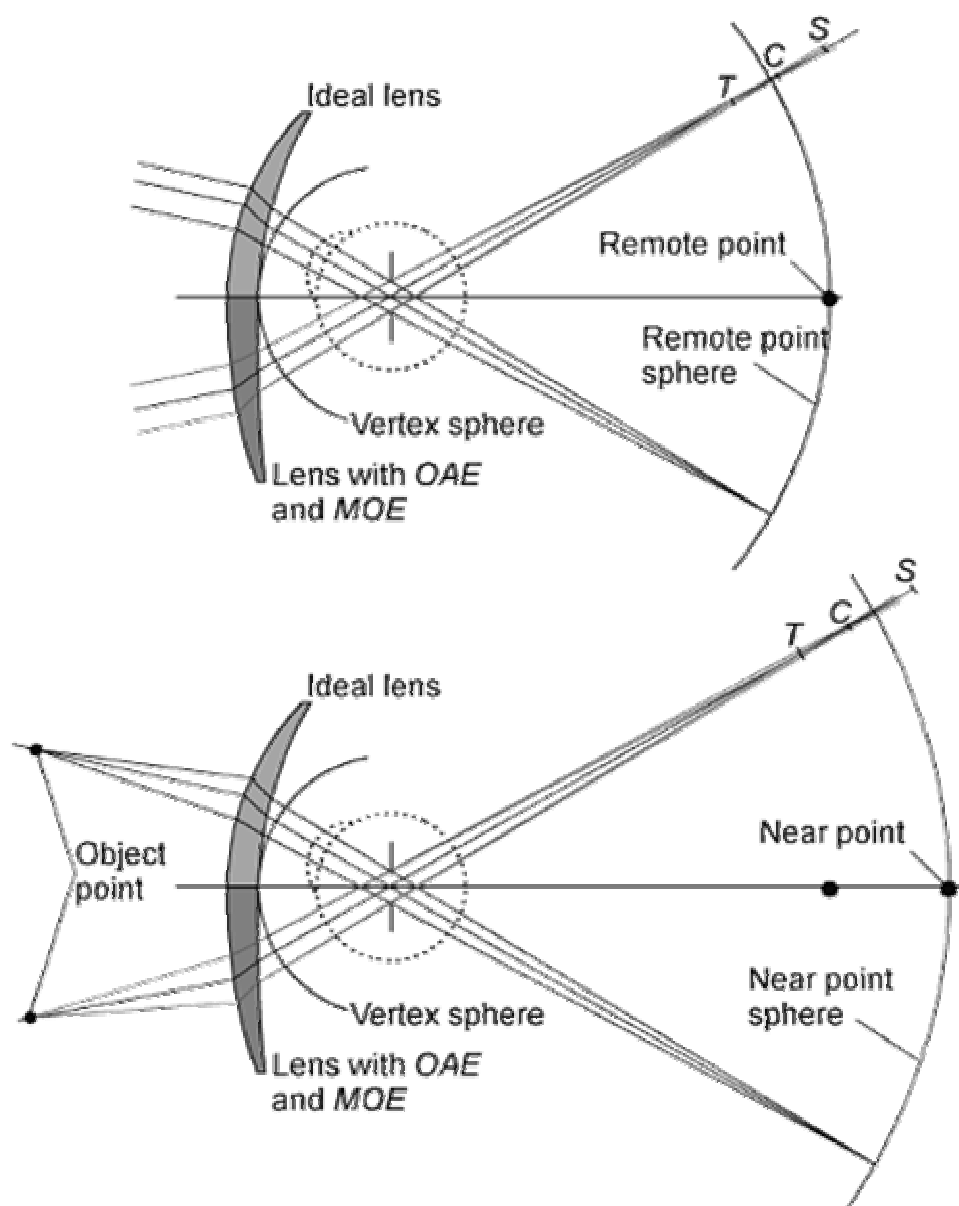
Le geometrie di una lente [15] sono tipicamente definite da superfici sferiche, asferiche, toriche, atoriche o a forma libera come nel caso delle lenti progressive o delle lenti iZon™.

Le prime lenti sferiche risultavano essere simmetriche, quindi biconcave o biconvesse. Successivamente sono state introdotte le lenti piano concave o piano convesse per arrivare infine alla classica geometria a menisco, nella quale la superficie anteriore risulta essere sempre convessa e la superficie posteriore sempre concava. In queste tipologie di lente, quando l'occhio ruota attorno al suo asse di rotazione [14] le posizioni dell'immagine sagittale e dell'immagine tangenziale (figura 7) non coincidono come si vorrebbe idealmente ed inoltre la posizione dell'immagine media non coincide con la sfera del punto remoto o del punto prossimo. In questo caso, come illustrato in figura 8, è possibile identificare, per ogni angolo di rotazione dell'occhio:

- un immagine tangenziale T,
- un immagine sagittale S,
- una immagine media C,
- un potere obliquo tangenziale  $P_T = 1/\overline{AT}$ ,
- un potere obliquo sagittale  $P_S = 1/\overline{AS}$ ,
- un potere obliquo medio  $P_C = 1/\overline{AC}$ , relativo alla miglior immagine,
- un errore obliquo tangenziale, dato dalla differenza tra la il potere frontale posteriore il potere obliquo tangenziale,
- un errore obliquo sagittale, dato dalla differenza tra la il potere frontale posteriore il potere obliquo sagittale,
- un errore obliquo astigmatico OAE (che ha significato equivalente all'astigmatismo dei raggi obliqui), dato dalla differenza tra il potere obliquo tangenziale il potere obliquo sagittale,
- un errore obliquo medio MOE, dato dalla differenza tra il potere frontale posteriore e il potere obliquo medio.



**Figura 7** Esempificazione del significato di immagine tangenziale e di immagine sagittale.

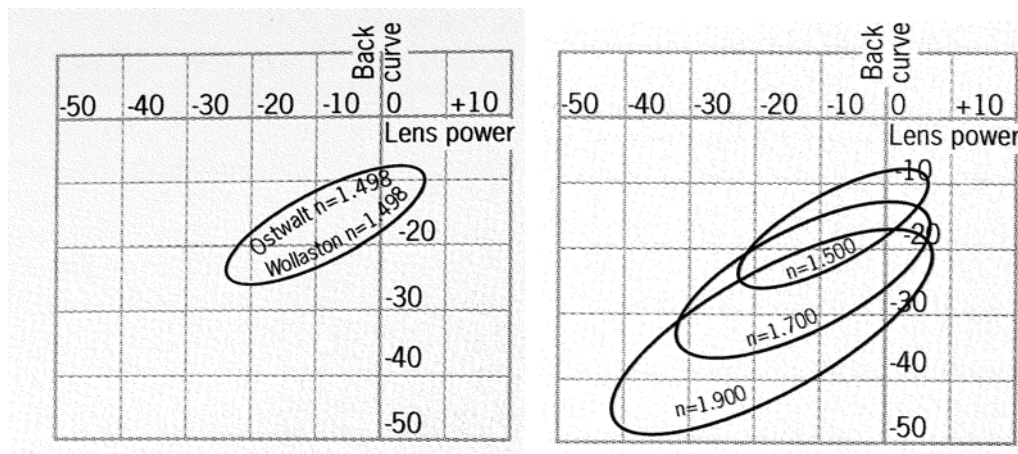


**Figura 8** Differenza tra una lente ideale e una lente reale (sopra nel caso della visione per lontano, sotto nel caso della visione per vicino). Con T è indicato il fuoco tangenziale, con S il fuoco sagittale e con C la posizione del fuoco medio o miglior immagine.

L'aberrazione delle lenti che più infastidisce il portatore d'occhiali risulta essere indubbiamente l'astigmatismo dei raggi obliqui, ossia la differenza tra il potere tangenziale e il potere sagittale che nasce quando l'occhio gira intorno al suo centro di rotazione (OAE). Nel caso delle lenti sferiche la soluzione del problema per un determinato angolo di rotazione

dell'occhio può essere ottenuta una particolare combinazione dei raggi di curvatura delle superfici [16]. Le lenti che impiegano la minimizzazione dell'errore obliquo astigmatico vengono dette point-focal.

La determinazione delle curvature delle superficie delle lenti che garantiscono l'annullamento dell'errore astigmatico per un determinato angolo di rotazione dell'occhio sono state proposte da Ostwalt e da Wollaston e sono tipicamente rappresentate attraverso l'ellisse di Tscherning (1904) (figura 9) [7], [17], che rappresenta per determinate caratteristiche del sistema occhio lente, quali la posizione della lente rispetto al centro di rotazione dell'occhio e l'indice di rifrazione della lente, il potere della superficie posteriore in funzione del potere della lente.



**Figura 9 Ellissi di Tscherning per la visione da lontano costruite nell'ipotesi che il centro di rotazione dell'occhio sia posto a 27 mm dalla superficie posteriore della lente. Nella stessa figura a sinistra si può notare il contributo apportato dalle soluzioni di Ostwalt e di Wollaston, mentre a destra l'influenza dell'indice di rifrazione.**

Come si può notare dai grafici in figura 9 per determinati poteri non esiste una soluzione che annulla l'errore obliquo astigmatico. Per superare questo inconveniente, ridurre lo spessore della lente (e conseguentemente il peso della stessa) ed ottenere lenti esteticamente migliori sono state introdotte le lenti asferiche, nelle quali una delle due superfici sferiche è stata sostituita con una superficie ottenuta per rotazione di una superficie conica [18]:

$$(6) \quad z(x,y) = \frac{x^2 + y^2}{R + \sqrt{R^2 - p(x^2 + y^2)}}$$

dove  $R$  è il raggio di curvatura al centro,  $p$  il coefficiente di asfericità: quando questo è pari a 1 si ottiene una sfera, per  $p=0$  si ottiene una parabola, per  $p<0$  un'iperbole, mentre per  $p>0$  un'ellisse. Tra le lenti ottenute con questo metodo ricordiamo quelle proposte da Zeiss (1909) [17] per la correzione dell'afachia, quelle di Merté (1950) [19] e quelle iperboliche di Jalie (1981) [14].

Una evoluzione di queste superficie, chiamate comunque asferiche, è ottenuta aggiungendo delle componenti polinomiali alla parte conicoidale:

$$(7) \quad z(x,y) = \frac{x^2+y^2}{R + \sqrt{R^2 - p(x^2+y^2)}} + A_4(x^2+y^2)^2 + A_6(x^2+y^2)^3 + \dots + A_{20}(x^2+y^2)^{10}$$

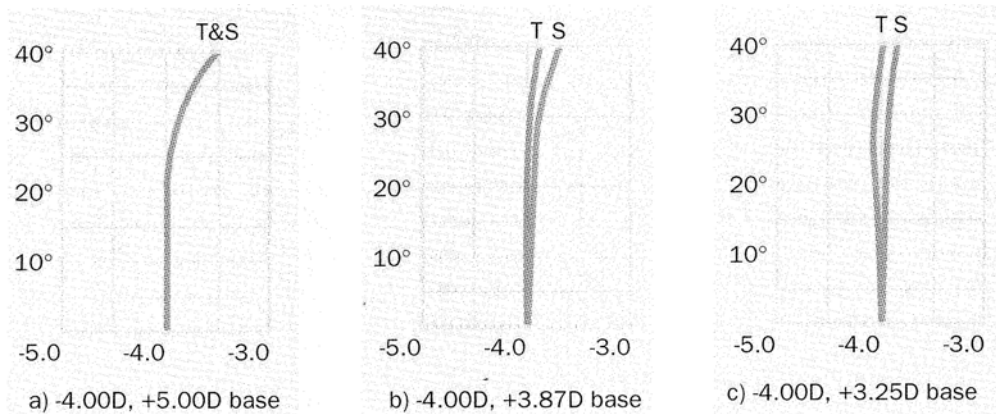
Questo tipo di soluzione risulta particolarmente utile nel caso di lenti ad alto potere, in quanto consentono di ridurre gli spessori e pesi della lente, senza compromettere eccessivamente la zona ottica [7].

In letteratura vengono proposti tre criteri che consentono l'ottimizzazione della geometria della lente e la valutazione del coefficiente di asfericità grazie al impiego dell'ipotesi di lente sottile ed impiegando la teoria del terz'ordine [7]: oltre alle già menzionate lenti point focal, che minimizzano l'astigmatismo dei raggi obliqui, si possono incontrare lenti progettate annullando l'errore obliquo tangenziale, per un determinato angolo di rotazione dell'occhio, o la soluzione di Percival (1914) che propone di annullare l'errore obliquo medio [14]. I risultati ottenuti applicando queste metodologie sono illustrati in figura 10.

Per ottenere i coefficienti di asfericità da impiegare a seconda del tipo di criterio di ottimizzazione scelto è possibile ricorrere alla risoluzione di un'equazione di terzo grado. In figura 11 sono rappresentati i coefficienti asfericità che consentono di annullare l'errore obliquo astigmatico di lenti con superficie anteriore asferica [20].

Per la correzione dell'astigmatismo è necessario impiegare lenti con una geometria che garantisca due curvature distinte su due direzioni tra loro ortogonali; questo è possibile grazie all'impiego di lenti toriche [7]; le problematiche relative a questa tipologia di lenti sono analoghe a quelle sferiche. Per ottenere caratteristiche ottiche più performanti è possibile

ricorrere a strategie analoghe a quelle illustrate per le lenti asferiche ottenendo lenti con geometria atorica, la cui definizione è spesso coperta da brevetto [21].



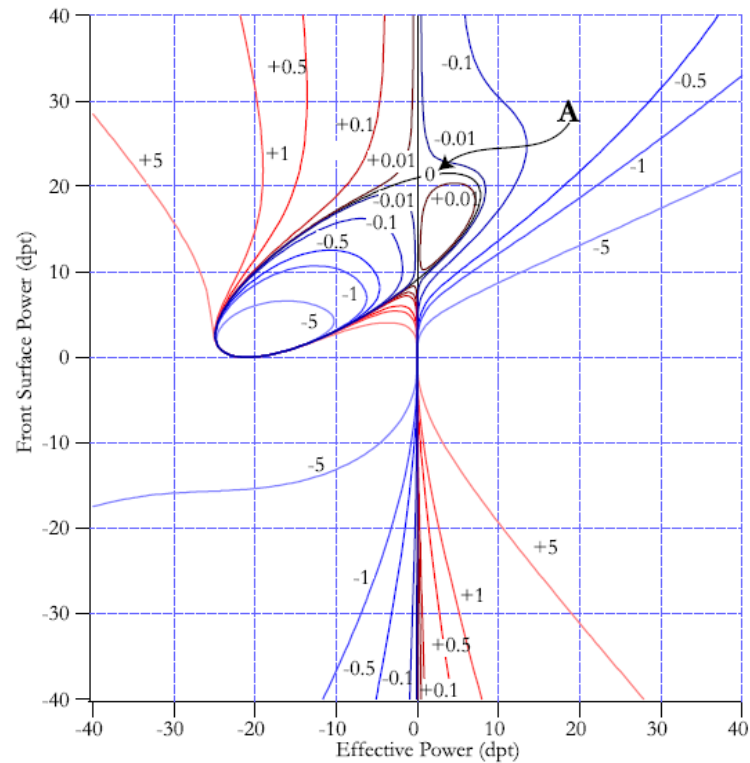
**Figura 10** Diagrammi di campo che descrivono le prestazioni fuori asse di una lente con geometria ottimizzata con potere  $-4.00\text{D}$ : a) geometria point-focal (annullamento dell'errore obliquo astigmatico per un particolare angolo di rotazione dell'occhio), b) geometria che minimizza l'errore obliquo tangenziale, c) geometria Percival (annullamento dell'errore obliquo medio).

La correzione della presbiopia può essere ottenuta con lenti multifocali o con lenti progressive. Le lenti multifocali [7] (figura 12) sono tipicamente costituite da due (bifocali) o tre (trifocali) zone a geometria sferica o asferica; usando indici di rifrazione differenti o diverse curvature delle zone, è possibile ottenere la necessaria correzione per le zone per la visione da lontano, da vicino ed eventualmente intermedia. La soluzione presenta delle discontinuità delle proprietà ottiche nella transizione da una zona all'altra. Per superare questo tipo di inconvenienti sono state introdotte le lenti progressive che garantiscono una variazione continua delle proprietà ottiche nel passaggio dalla visione per il lontano alla visione per il vicino.

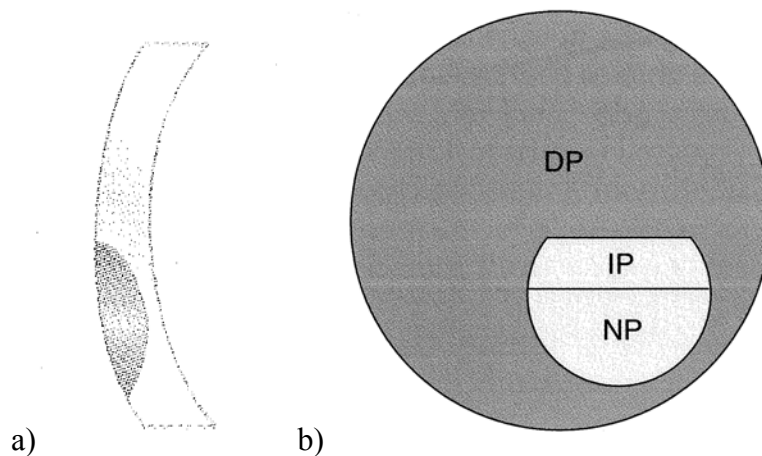
In una lente progressiva (figura 13) è possibile individuare una zona ottica per la visione da lontano, una zona ottica per la visione da vicino e un canale lungo il quale le proprietà ottiche variano gradualmente dalla zona per lontano alla zona per vicino, mantenendo gli astigmatismi il più bassi possibile. Le variazioni delle proprietà ottiche sono tipicamente ottenute realizzando una superficie con curvatura variabile.

Nel caso di afachia, cioè di assenza di cristallino, come avviene dopo un'operazione di cataratta, si ricorre all'impiego di lenti a potere particolarmente elevato. Tali lenti [7] (figura 14) sono definite tipicamente con un profilo polinomiale e presentano un raccordo necessario

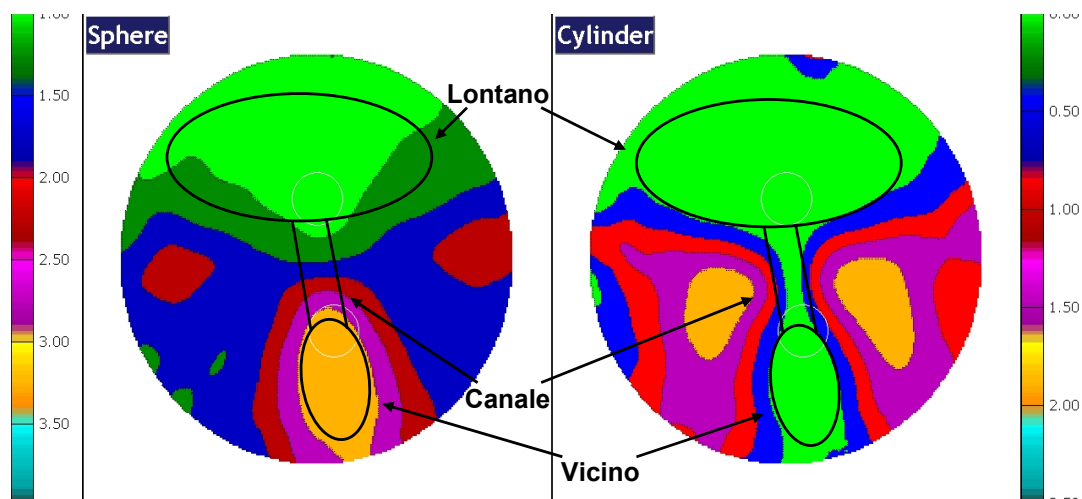
per diminuire lo spessore della lente ed evitare i tipici problemi di scotoma che nascono in queste condizioni.



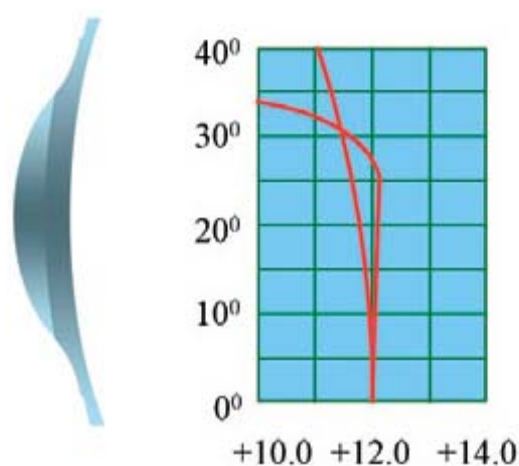
**Figura 11** Coefficienti di asfericità per la progettazione di lenti point focal con superficie anteriore asferica, in funzione del potere della lente e del potere della superficie anteriore: oggetto all'infinito,  $n=1.525$ , lente posta a 25 mm dal centro di rotazione dell'occhio. Con A è indicata l'elisse di Tscherning.



**Figura 12** Schematizzazione di una lente bifocale (a) e di una lente trifocale (c), dove si può notare una zona per la visione da lontano (DP), una zona per la visione intermedia (IP) e una zona per la visione da vicino (NP)



**Figura 13** Mappa del potere e dell'astigmatismo per una lente progressiva. Nella figura sono inoltre illustrate le zone per la visione da lontano, da vicino e il canale lungo il quale le caratteristiche ottiche variano gradualmente, mantenendo valori di astigmatismo trascurabili.



**Figura 14** Lente di potere pari a 12 D da impiegarsi dopo un intervento di cataratta.

Impiegando un aberrometro Zview™ è possibile indagare il fronte d'onda di un fascio di luce inviato nell'occhio, ottenendo una mappa completa delle aberrazioni dell'occhio insieme alle tradizionali grandezze caratteristiche da correggere, quali il potere l'astigmatismo e l'asse. Le nuove lenti iZon™ Wavefront-Guided Lens (2005) consentono di correggere oltre alle tradizionali prescrizioni anche problematiche legate all'aberrazione del fronte d'onda.



## ***II.2 Progettazione delle lenti oftalmiche***

Le metodologie di progettazione di una lente oftalmica non possono prescindere dalla tecnologia impiegata per realizzare la lente. Per evitare di prendere in considerazione la tecnica di progettazione più adatta per ogni tipologia di processo è possibile individuare le metodologie che portano alla definizione della geometria della lente escludendo in questo contesto le problematiche legate alla progettazione di stampi, di lenti semifinite o di lenti finite.

La prima cosa che deve essere presa in considerazione è la prescrizione ottica che viene fatta dall'oculista. Successivamente è necessario individuare il materiale con il quale si vuole realizzare la lente [22]. Noto che sia il suo indice di rifrazione, e fissata la curvatura di una delle due superfici, è possibile, attraverso le (3), (3) e (5), calcolare il raggio di curvatura dell'altra superficie e lo spessore al centro della lente; per quanto riguarda quest'ultimo parametro bisogna tenere presente che lo spessore minimo è legato a caratteristiche di resistenza del materiale e varia tipicamente tra 1 e 2 mm, e che nel caso di lenti negative lo spessore minimo è al centro, mentre nel caso di lenti positive lo spessore minimo è al bordo e di conseguenza è necessario prendere in considerazione anche il diametro della lente.

Noti i raggi di curvatura, si va a decidere la strategia di ottimizzazione della geometria della lente, quale la minimizzazione dell'errore tangenziale, la minimizzazione dell'errore medio o l'annullamento dell'astigmatismo per un determinato angolo di rotazione dell'occhio, e quindi a calcolare il coefficiente di asfericità necessario per ottenere la geometria ottimale [16]. Tale coefficiente può essere stimato via software oppure impiegando diagrammi di supporto simili a quelli presentati in figura 11 [20].

Nella realizzazione di semilavorati asferici è tipicamente possibile giungere alla definizione di un set pezzi che vengono detti base [17]; dalla lavorazione sferica della superficie posteriore è possibile ottenere tutte le lenti che si desiderano con poteri che aumentano progressivamente di 0.25 D; i coefficienti asfericità impiegati nella definizione della geometria dei semifiniti base, vengono in questo caso calcolati in modo da garantire l'ottimizzazione della geometria per il valore medio della gamma di poteri che si possono ottenere con quel semilavorato.

Nel caso in cui si parta da un semifinito sferico e si vada a lavorare la superficie posteriore della lente con geometria asferica i coefficienti di asfericità possono essere calcolati caso per caso a seconda del potere che si desidera ottenere, basandosi sulla teoria del terz'ordine o con metodi più precisi.

### **II.3 Modellazione geometrica di lenti atoriche**

Proponiamo in questo paragrafo due metodologie per la modellazione geometrica di lenti atoriche non ancora sperimentate. Entrambe le formulazioni risultano un'estensione della geometria asferica e concettualmente è possibile estendere i principi applicati alle forme polinomiali.

La prima formulazione consiste nel definire la superficie in coordinate cilindriche  $r$ ,  $\theta$  e di comporre le due curve asferiche dando a ciascuna rispettivamente un peso pari a al quadrato del seno e al quadrato del coseno dell'angolo:

$$(8) \quad A1(r,\theta) = \begin{pmatrix} x1(r,\theta) \\ y1(r,\theta) \\ z1(r,\theta) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} r \cdot \cos(\theta) \\ r \cdot \sin(\theta) \\ \frac{r^2}{R_1 + \sqrt{R_1^2 - p_1 \cdot r^2}} \cos^2(\theta) + \frac{r^2}{R_2 + \sqrt{R_2^2 - p_2 \cdot r^2}} \sin^2(\theta) \end{pmatrix}$$

che può essere riscritta in coordinate cartesiane come segue:

$$(9) \quad z1(x,y) = \frac{x^2}{R_1 + \sqrt{R_1^2 - p_1 \cdot (x^2 + y^2)}} + \frac{y^2}{R_2 + \sqrt{R_2^2 - p_2 \cdot (x^2 + y^2)}}$$

dove  $R_1$  ed  $R_2$  sono i due raggi principali e forniscono le proprietà ottiche desiderate, mentre  $p_1$  e  $p_2$  sono i coefficienti di asfericità per l'ottimizzazione della geometria.

La seconda formulazione consiste nel dare lo stesso tipo di peso ai parametri che compaiono nell'equazione di una superficie asferica, cioè il raggio al centro e il coefficiente di asfericità, anziché all'intera equazione, ottenendo:

$$(10) \quad A2(r,\vartheta) = \left( \begin{array}{c} r \cdot \cos(\vartheta) \\ r \cdot \sin(\vartheta) \\ r^2 \\ \hline R_1 \cos(\vartheta)^2 + R_2 \sin(\vartheta)^2 + \sqrt{(R_1 \cos(\vartheta)^2 + R_2 \sin(\vartheta)^2)^2 - (p_1 \cos(\vartheta)^2 + p_2 \sin(\vartheta)^2) r^2} \end{array} \right),$$

che può essere riscritta in coordinate cartesiane come segue:

$$(11) \quad z2(x,y) = \frac{(x^2 + y^2)^2}{R_1 x^2 + R_2 y^2 + \sqrt{(R_1 x^2 + R_2 y^2)^2 - (p_1 x^2 + p_2 y^2)(x^2 + y^2)}}.$$

## ***II.4 Modellazione geometrica di lenti progressive***

### **II.4.1 Stato dell'arte**

Le metodologie proposte in letteratura per la modellazione geometrica di lenti progressive si possono sostanzialmente suddividere in due categorie a seconda della tecnica impiegata per ottenere la variazione di indice di rifrazione; la prima consiste nell'ottenere le caratteristiche ottiche desiderate attraverso la variazione dell'indice di rifrazione [20], mentre la seconda consiste nell'agire sulla curvatura della superficie [23]. La maggior parte delle strategie per la modellazione di lenti progressive non sono riportate in letteratura ma possono essere reperite su una numerosa quantità di brevetti, alcuni dei quali citati in [20].

Le lenti a gradiente di indice GRIN, non diffuse commercialmente per quanto noto all'autore, consentono di ottenere la progressione sulla superficie della lente grazie alla variazione dell'indice di rifrazione il cui valore locale viene definito attraverso lo studio del fronte d'onda, andando a controllare l'errore obliquo medio e l'errore obliquo astigmatico.

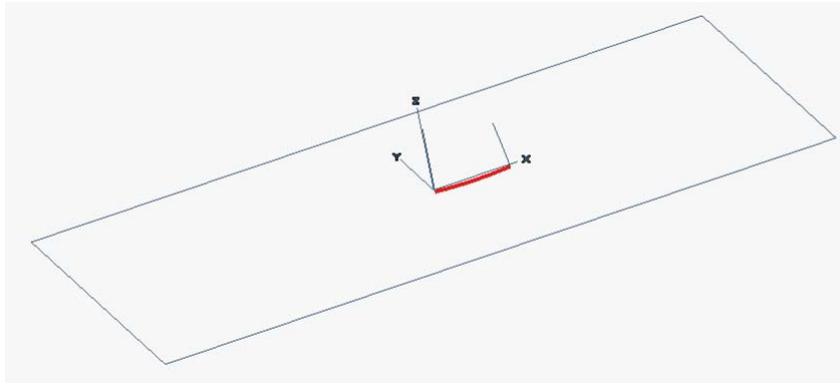
Come verrà descritto nel paragrafo III.1.5 esiste, nel caso si ipotizzi la lente sottile e che l'indice di rifrazione sia costante sulla lente, una stretta correlazione tra quelle che sono le proprietà ottiche di una lente e la sua curvatura. Nel metodo proposto da Loss [23] il problema di ottenere le curvature necessarie a garantire le proprietà ottiche desiderate viene risolto minimizzando una funzione di errore definita come segue:

$$(12) \quad J(x,y)=\int_{\Omega} \alpha(x,y) \left( \frac{\kappa_1(x,y)-\kappa_2(x,y)}{2} \right)^2 + \beta(x,y) \left( \frac{\kappa_1(x,y)+\kappa_2(x,y)}{2} - P(x,y) \right)^2 dx dy ,$$

dove  $P(x,y)$  è la funzione di curvatura media desiderata,  $\alpha(x,y)$  e  $\beta(x,y)$  sono funzioni di peso per considerare la differenza tra le curvature principali  $\kappa_1$  e  $\kappa_2$  (che vanno ad influire sull'astigmatismo) e la differenza tra la curvatura media attesa e la curvatura media effettiva. Altre soluzioni al problema della minimizzazione della funzione di errore vengono proposti da F. Santosa [24], che consentono di ottenere una superficie definita da B-splines.

#### II.4.2 Metodologie sviluppate

Passiamo ora a descrivere le due metodologie implementate per l'ottenimento di modelli geometrici di superfici di lenti progressive; la prima è basata sull'impiego di un software per la modellazione di superfici, mentre la seconda fornisce un metodo analitico per la definizione della superficie come nuvola di punti.

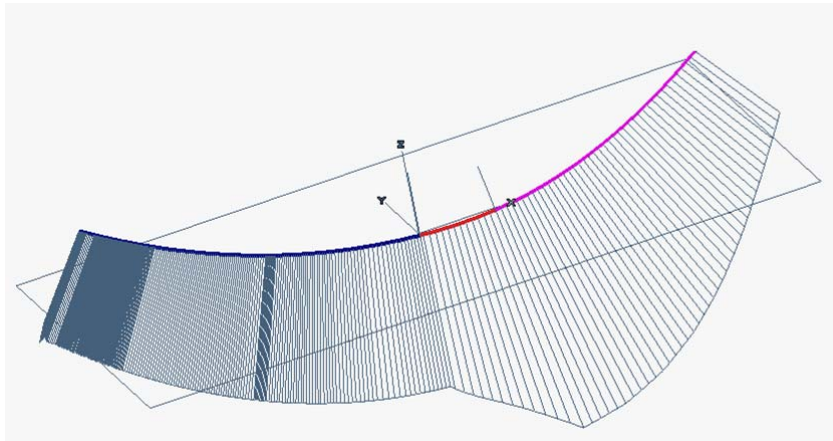


**Figura 15 Importazione delle coordinate del canale e costruzione di una curva di interpolazione.**

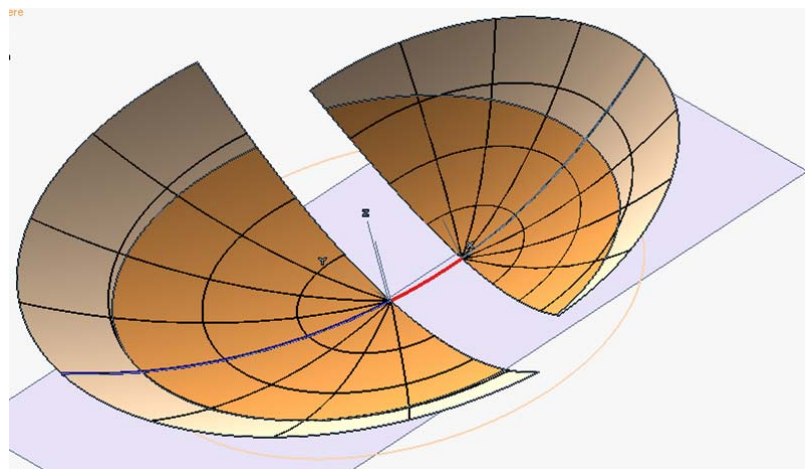
Nel primo caso si parte dalla definizione in un ambiente esterno di una nuvola di punti che stabilisce le coordinate cartesiane del canale, in modo che questo garantisca una transizione continua della curvatura, dalla zona per la visione da lontano alla zona per la visione da vicino. Tale nuvola di punti viene importata nell'ambiente di modellazione e interpolata (figura 15).

Analogamente si procede importando i profili delle zone per lontano e per vicino (sezioni coniche) ancora come punti. Si prosegue quindi ad interpolazione e si dispongono le curve in

modo da garantire continuità di posizione e tangenza delle curve con il canale; questo garantisce anche la continuità in curvatura (figura 16). La fase successiva prevede la definizione delle superfici per la visione da lontano e da vicino ottenute per rotazione attorno alla normale nel centro delle coniche, come illustrato in figura 17.

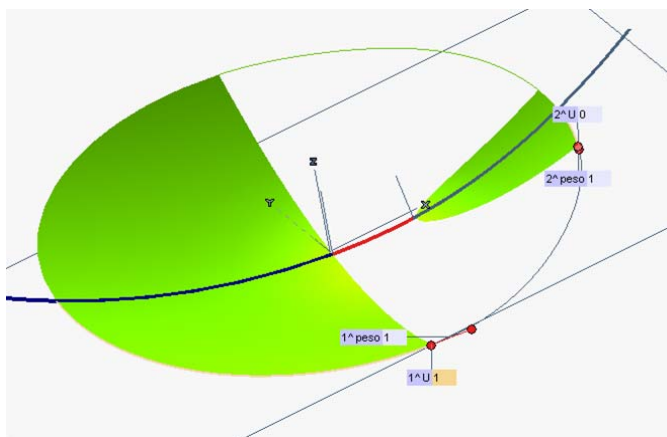


**Figura 16** Importazione delle coniche per la definizione delle zone per la visione da vicino e da lontano come nuvola di punti, definizione delle curve di interpolazione per le medesime zone, disposizione delle curve in modo da ottenere continuità con il canale e diagramma della curvatura delle tre curve.



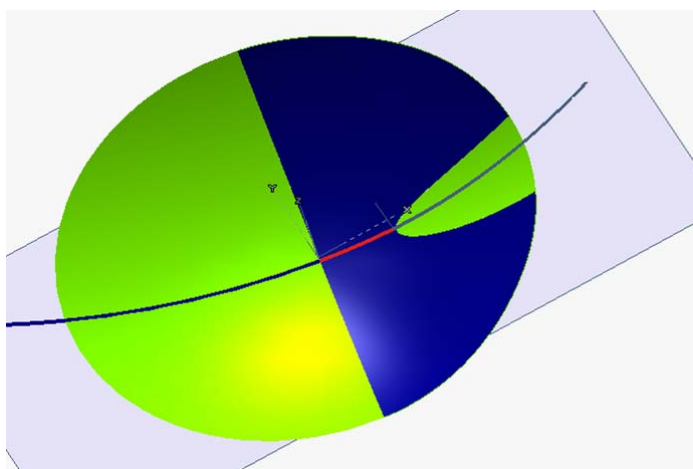
**Figura 17** Costruzione delle superfici per la visione da lontano e per la visione da vicino attraverso una rotazione delle sezioni coniche rispetto alla loro normale nel punto di unione con il canale.

A questo punto si vanno a definire le dimensioni delle superfici delle zone per la visione da lontano e da vicino, si limitano a queste zone le estensioni delle superfici conoidali e si costruiscono le curve di supporto per la costruzione della zona intermedia, basandosi sulle superfici precedentemente ottenute (figura 18).



**Figura 18 Delimitazione delle aree delle zone per la visione e costruzione di curve di supporto per la definizione della zona di raccordo.**

Appoggiandosi sulle curve descritte e sul canale è possibile andare a modellare una superficie che garantisce continuità di curvatura rispetto alle superfici per la visione da lontano e per la visione da vicino, ottenendo così l'intera superficie della lente rappresentata in figura 19.

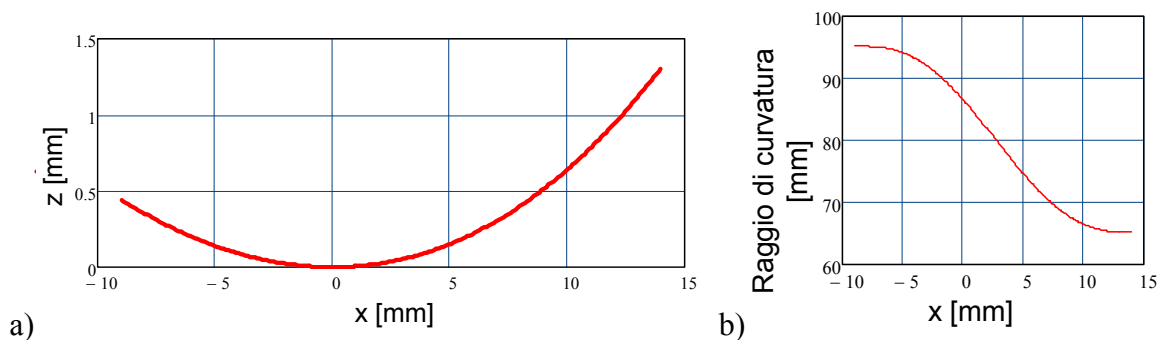


**Figura 19 Superficie della lente modellata, completata con a zona di raccordo.**

Data la molteplicità delle soluzioni richieste per la correzione della presbiopia, che spesso inoltre è spesso associata a problemi di astigmatismo, il metodo descritto presenta l'inconveniente di essere poco pratico ai fini della produzione di massa. Questo è soprattutto accentuato dall'avvento della tecnologia free-form per la lavorazione della superficie sulla superficie posteriore direttamente con operazioni di asportazione di truciolo.

Per superare questo tipo di inconvenienti, nonché l'impossibilità di controllare l'andamento degli astigmatismi nella zona di raccordo, è stata sviluppata una metodologia per la definizione della superfici che prescindesse dallo stato dell'arte, spesso coperto da diritti brevettuali. La descrizione della metodologia viene proposta in termini sommari in quanto potrebbe essere soggetta a una prossima brevettazione.

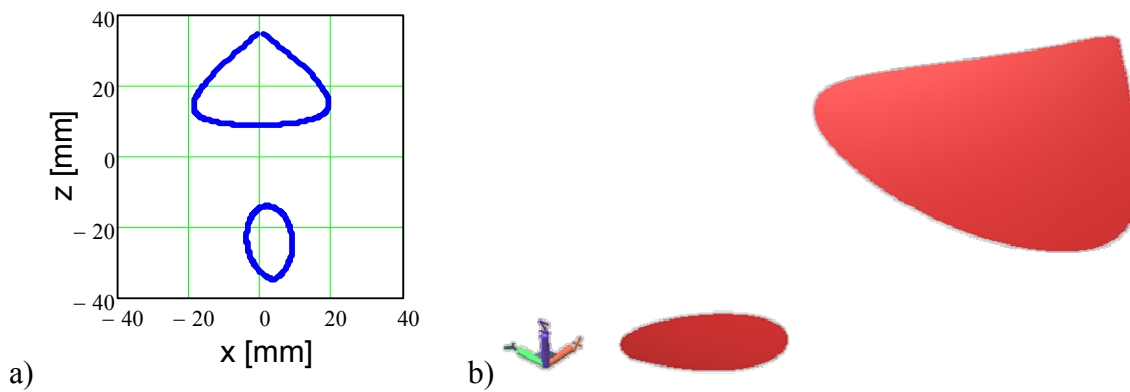
Partendo dalle tradizionali relazioni dell'ottica è possibile definire il raggio di curvatura della zona per la visione da lontano e per la visione da vicino. Noti tali raggi è possibile definire la legge di curvatura del canale che garantisca la continuità della derivata seconda della curvatura (curve G2). Questo può essere ottenuto ad esempio con una polinomiale di quinto grado (figura 20 b). Dalla legge di curvatura del canale si può passare alla sua definizione numerica per punti in coordinate cartesiane attraverso un metodo numerico basato sull'avvicinamento di circonferenze successive (figura 20 b).



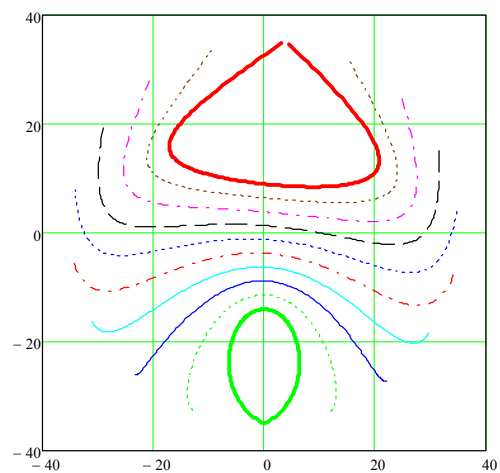
**Figura 20 Geometria del canale (a) ottenuta da una specifica legge di curvatura (b).**

A questo punto è possibile definire la dimensione delle zone per la visione da lontano e da vicino e andare a costruire le medesime superfici, garantendo la continuità di curvatura con il canale come illustrato in figura 21.

La definizione della superficie di raccordo viene data basandosi su curve parametriche piane (figura 22) che vengono proiettate su superfici asferiche che variano gradualmente il raggio di curvatura ottenendo così una progressiva variazione delle proprietà ottiche della superficie. La metodologia descritta, con opportune modifiche e considerazioni, può essere estesa a zone per la visione da lontano e da vicino che presentino una componente astigmatica o dir che si voglia due raggi di curvatura distinti su due direzioni tra loro ortogonali, mantenendo questa proprietà anche lungo il canale.



**Figura 21** Definizione dell'ampiezza delle zone per la visione da lontano e per la visione da vicine (a) e delle relative superfici (b).



**Figura 22** Curve di supporto per la determinazione della zona di raccordo.



## **Capitolo III**

### **Sviluppo di strumenti per l'analisi dei modelli geometrici**

L'impiego di strumenti di analisi di modelli geometrici consente in generale di non dover ricorrere alla prototipazione fisica dei modelli per valutarne la loro funzionalità.

Nell'ambito dell'ottica i principali strumenti utilizzabili per la valutazione delle proprietà ottiche dei modelli geometrici sono basati sullo studio della curvatura delle superfici, sul ray tracing o sulla valutazione dell'aberrazione del fronte d'onda.

Gli strumenti commerciali utili a questi tipi di analisi non dichiarano il metodo di calcolo impiegato e non forniscono valori relativi all'incertezza dei risultati forniti; inoltre non tengono in considerazione la disposizione della lente rispetto all'occhio e risultano spesso poco intuitivi e di difficile impiego. Un altro aspetto che complica la situazione è legato al tipo di modelli utilizzati, che nella presente trattazione si riconducono a mesh poliedriche o a nuvole di punti.

Tali motivazioni hanno indotto a sviluppare e validare strumenti creati appositamente per le analisi ottico-geometriche di modelli di lenti, basati sul calcolo della curvatura e su tecniche di ray tracing, adattati al caso particolare di lenti oftalmiche, prestando particolare attenzione alla configurazione del sistema occhio lente. Tali strumenti si rivelano utili sia per l'analisi di modelli geometrici che per lo studio di modelli fisici rilevati con macchina di misura a coordinate; in quest'ultimo caso i risultati ottenuti risultano comparabili con i risultati ottenuti da misure fatte con strumentazione ottica.

### **III.1 Valutazione della curvatura per l'analisi ottica**

La curvatura è una proprietà geometrica intrinseca di una curva o di una superficie, cioè indipendente dal particolare sistema di riferimento utilizzato, ed ha una stretta correlazione con le proprietà ottiche di lenti e specchi.

In questo paragrafo viene descritto lo sviluppo e la validazione di strumenti per il calcolo della curvatura di curve e superfici definite da nuvole di punti. Successivamente viene spiegata la metodologia che consente di passare dall'analisi di curvatura alla definizione delle caratteristiche ottiche della lente.

#### **III.1.1 Curvatura di curve e superfici analitiche [25]**

Data l'equazione in forma esplicita di una curva su un piano cartesiano

$$(13) \quad y = f(x),$$

è possibile calcolarne la sua curvatura  $1/\rho$  attraverso la seguente relazione

$$(14) \quad \frac{1}{\rho} = \frac{d^2f(x)/dx^2}{\left[1 + \left(d^2f(x)/dx^2\right)^2\right]^{3/2}}.$$

Nel caso in cui la curva sia definita in forma parametrica

$$(15) \quad x=x(u), \quad y=y(u),$$

allora la sua curvatura è definita da:

$$(16) \quad \frac{1}{\rho} = \frac{x^u y^{uu} - x^{uu} y^u}{\left[(x^u)^2 + (y^u)^2\right]^{3/2}},$$

dove  $x^u$  rappresenta la derivata di  $x(u)$  fatta rispetto ad  $u$  e  $y^u$  rappresenta la derivata di  $y(u)$  fatta rispetto ad  $u$ .

Per quanto riguarda il calcolo della curvatura di una superficie le cose si complicano leggermente. Infatti, ogni piano che passa per la normale alla superficie, interseca la stessa

generando una curva; su ciascuna di queste curve è possibile determinare la curvatura come descritto precedentemente. È possibile dimostrare ogni superficie possiede una direzione per la quale la curvatura è massima e una direzione per la quale la curvatura è minima e che queste due direzioni sono tra loro ortogonali; tali direzioni vengono dette direzioni principali.

Si supponga di avere una superficie  $\mathbf{p}$  definita in forma parametrica

$$(17) \quad \mathbf{p} = \mathbf{p}(u,v),$$

dove  $\mathbf{p}$  è il vettore formato dalle coordinate cartesiane

$$(18) \quad x = x(u,v), \quad y = y(u,v), \quad z = z(u,v).$$

Prima di passare al calcolo delle curvature e delle direzioni principali della superficie è necessario definire la normale alla superficie  $\mathbf{n}$ , i coefficienti della prima forma fondamentale  $E, F, G$  e i coefficienti della seconda forma fondamentale  $L, M, N$  attraverso le seguenti relazioni:

$$(19) \quad \mathbf{n}(u,v) = \frac{|\mathbf{p}^u \times \mathbf{p}^v|}{|\mathbf{p}^u \times \mathbf{p}^v|},$$

$$(20) \quad \begin{aligned} E &= \mathbf{p}^u \cdot \mathbf{p}^u \\ F &= \mathbf{p}^u \cdot \mathbf{p}^v, \\ G &= \mathbf{p}^v \cdot \mathbf{p}^v \end{aligned}$$

$$(21) \quad \begin{aligned} L &= -\mathbf{p}^u \cdot \mathbf{n} \\ M &= -1/2(\mathbf{p}^u \cdot \mathbf{n}^v + \mathbf{p}^v \cdot \mathbf{n}^u) \\ N &= -\mathbf{p}^v \cdot \mathbf{n} \end{aligned}$$

Noti che siano i coefficienti delle forme fondamentali è possibile ricavare le curvature principali come radici della seguente equazione:

$$(22) \quad (EG - F^2)\chi^2 - (EN + GL - 2FM)\chi + (LN - M^2) = 0,$$

Per riassumere in ogni punto della superficie i valori della curvatura è possibile ricorrere alla definizione di curvatura gaussiana  $K$  e di curvatura media  $H$  definite come segue:

$$(23) \quad K = \chi_1 \chi_2 = \frac{LN - M^2}{EG - F^2},$$

$$(24) \quad H = \frac{1}{2}(\chi_1 + \chi_2) = \frac{EN + GL - 2FM}{2(EG - F^2)}.$$

La direzioni principali delle curvatura vengono invece determinate dalle radici della seguente equazione:

$$(25) \quad (FN - GM)h^2 + (EN - GL)h + EM - FL = 0,$$

dove

$$(26) \quad h = dw/du.$$

È inoltre possibile stabilire la curvatura lungo una determinata direzione noto che sia l'angolo  $\alpha$  della direzione rispetto alla direzione principale di  $\chi_1$ :

$$(27) \quad \chi_n = \chi_1 \cdot \cos^2 \alpha + \chi_2 \cdot \sin^2 \alpha.$$

### III.1.2 Metodologie per l'analisi di curvatura di curve e superfici discretizzate

La capacità di calcolare la curvatura a partire da una mesh, è tipicamente complicata dal fatto che manca una vera e propria definizione analitica della superficie. Le mesh sono infatti descritte da un insieme di vertici, mentre la curvatura è una funzione legata a come la superficie si comporta in un intorno di un dato vertice. In letteratura sono presenti vari metodi per l'analisi di curvatura di curve e superfici discretizzate che possono essere classificati in:

- metodi di fitting;
- metodi discreti;
- metodi basati sulla stima del tensore di curvatura.

La prima discriminante tra i vari metodi di fitting è la scelta della funzione che approssima localmente la forma della superficie. Generalmente vengono usate funzioni con una parametrizzazione locale per semplificare i calcoli. Tali funzioni vengono adattate per ogni vertice della mesh, e calcolati i coefficienti della funzione approssimante. Le principali funzioni interpolanti sono forme quadratiche e loro varianti [26], [27], [28], [29]. Queste forme sono state ampiamente analizzate per trovare buone approssimazioni locali in

particolare in [30] si mettono in risalto le problematiche di tali funzioni per mesh ad alta curvatura o per approssimazione di patch sferiche e cilindriche.

Una espansione del metodo quadratico è stata proposta da Gatzke et al. [31] in cui viene sostituita la proiezione sul piano tangente usando gli algoritmi di Desbrun et al. [32] e Sheffer [33]. Goldfeather et al. [34] invece sostituiscono la funzione quadratica con una funzione cubica tenendo conto delle normali dei vertici vicini al vertice in questione. Altri metodi utilizzano spline [35] o patch biquadratiche di Bézier [36] per approssimare localmente la mesh.

Per eliminare una parte molto onerosa del calcolo delle curvature associato ai metodi di fitting, sono stati introdotti dei metodi discreti che risultano essere computazionalmente molto più veloci. Il limite di questi metodi è che forniscono solo un sottoinsieme delle direzioni delle curvature mentre con i metodi di fitting queste possono essere calcolate direttamente dalla superficie approssimante ed inoltre risulta più complicato definire la dimensione dell'insieme dei punti impiegati per il calcolo della curvatura. Gli autori [27], [37], [38] considerano dei metodi basati sul teorema di Gauss-Bonnet [39], [40]. Questo metodo è molto utilizzato per l'eleganza nella formulazione e la velocità del calcolo, basato sulla valutazione degli angoli dei vertici vicini e delle aree ad essi associate.

In particolare Meek et al. [41] forniscono una analisi degli errori per questo metodo, mentre altri autori [42] applicano questo metodo per un calcolo integrale della curvatura media. Un altro metodo che coinvolge gli angoli è il metodo dell'eccesso dell'angolo [28]. In molti lavori invece il calcolo della curvatura è basato sulla approssimazione con circonferenze che intercettano il vertice sul quale si vuole la stima della curvatura e quelli vicini [43], [44] e successivamente per il calcolo delle curvature viene utilizzato il teorema di Eulero-Meusnier [39], [40].

Un metodo simile a quelli discreti sopra riportati è la stima del tensore di curvatura. La differenza è che non viene impostato direttamente un calcolo delle curvature e delle direzioni ma queste vengono calcolate attraverso l'utilizzo del tensore. Come complessità computazionale questo metodo risulta essere più rapido rispetto ai metodi di fitting ma notevolmente più oneroso se paragonato ai metodi discreti.

Il più noto metodo per ricostruire il tensore di curvatura è quello proposto da Taubin [45] poi esteso da Hamieri et al. [46] tenendo conto anche delle regioni appartenenti ai poligoni vicini e cambiando i pesi non più basandoli sulle aree dei triangoli ma sulle distanze, o sugli angoli [47].

Affianco a queste metodologie di estensione ai vertici vicini si sono sviluppati altri meccanismi di valutazione dei vettori per migliorare l'algoritmo e renderlo insensibile al rumore [48], [49], [50].

I metodi che più si prestano all'analisi di curvatura di superfici ottiche sono quelli basati sul fitting locale in quanto consentono di limitare l'effetto del rumore e della disomogeneità del campionamento; inoltre, con semplici accorgimenti è possibile andare ad analizzare localmente aree di dimensioni paragonabili a quelle effettivamente impiegate dall'occhio.

### III.1.3 Sviluppo di strumenti per l'analisi della curvatura di profili definiti da nuvole di punti

Al fine di studiare la curvatura di profili acquisiti mediante profilometro a tastatore sono stati sviluppati tre semplici metodi che consentono di filtrare anche le varie "impronte digitali" della lavorazione, nonché gli effetti di rumore.

I primi due metodi sviluppati sono basati sul calcolo della curvatura attraverso un'interpolazione circolare per tre punti; nel primo caso i tre punti sono determinati calcolando il valor medio dei punti circostanti a ciascun punto che definisce la circonferenza, mentre nel secondo caso, per trovare i tre punti, si ricorre a un fitting quadratico locale.

Il terzo metodo, più semplice ed efficace, prevede di costruire un fitting quadratico nell'intorno del punto sul quale si desidera stimare la curvatura e successivamente si procede alla valutazione della curvatura sul medesimo punto della quadrica di fitting.

Illustriamo meglio quanto spiegato sopra, considerando che i punti acquisiti (circa 15000) sono equispaziati di circa  $5\text{ }\mu\text{m}$  sull'asse  $x$ .

Impiegando il primo metodo si vanno a sostituire le coordinate  $z_i$  della curva con le nuove coordinate  $z_{1,i}$  determinate come medie locali in un intorno costituito da  $2k+1$  punti:

$$(28) \quad z_{1_i} = \frac{\sum_{h=i-k}^{i+k} z_i}{2k+1}.$$

Successivamente si provvede a definire un intero  $n$  che stabilisce l'intervallo tra i tre punti successivi che definiscono la circonferenza di interpolazione: la curvatura calcolata sul punti  $i$ -esimo sarà data dal reciproco del raggio della circonferenza passante per i punti  $(x_{i-n}, z_{1_{i-n}})$ ,  $(x_i, z_{1_i})$  e  $(x_{i+n}, z_{1_{i+n}})$ . Per risolvere agilmente questo problema il centro della circonferenza è stato determinato calcolando l'intersezione delle normali passanti per i punti medi dei segmenti per  $(x_{i-n}, z_{1_{i-n}})$ ,  $(x_i, z_{1_i})$  e  $(x_i, z_{1_i})$ ,  $(x_{i+n}, z_{1_{i+n}})$ .

Impiegando il secondo metodo per ottenere i punti  $z_{1_i}$  si deve selezionare come prima un intervallo di  $2k+1$  punti sui quali si va a costruire una parabola di fitting ai minimi quadrati sui dati selezionati. Il valori filtrati dei dati  $z_{1_i}$  è in questo caso dato dalla parabola

$$(29) \quad z_{1_i} = a_i \cdot x_i^2 + b_i \cdot x_i + c_i \cdot x_i,$$

dove i coefficienti  $a_i$ ,  $b_i$  e  $c_i$  vengo calcolati risolvendo il sistema lineare (30), ottenuto annullando la derivata prima rispetto ad  $a_i$ ,  $b_i$  e  $c_i$  della funzione che rappresenta la somma delle distanze dei punti  $z_i$  della parabola stessa.

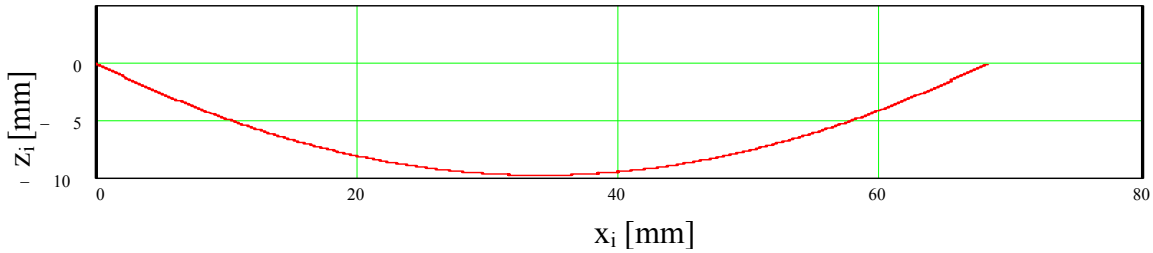
$$(30) \quad \begin{pmatrix} \sum_{h=i-k}^{i+k} x_h^4 & \sum_{h=i-k}^{i+k} x_h^3 & \sum_{h=i-k}^{i+k} x_h^2 \\ \sum_{h=i-k}^{i+k} x_h^3 & \sum_{h=i-k}^{i+k} x_h^2 & \sum_{h=i-k}^{i+k} x_h^1 \\ \sum_{h=i-k}^{i+k} x_h^2 & \sum_{h=i-k}^{i+k} x_h^1 & 2(2k+1) \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} a_i \\ b_i \\ c_i \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sum_{h=i-k}^{i+k} z_h x_h^2 \\ \sum_{h=i-k}^{i+k} z_h x_h \\ \sum_{h=i-k}^{i+k} z_h \end{pmatrix}.$$

Noti i coefficienti delle parabole di fitting si procede come nel caso precedente, determinando la curvatura sul punto  $i$ -esimo come reciproco del raggio della circonferenza passante per tre punti.

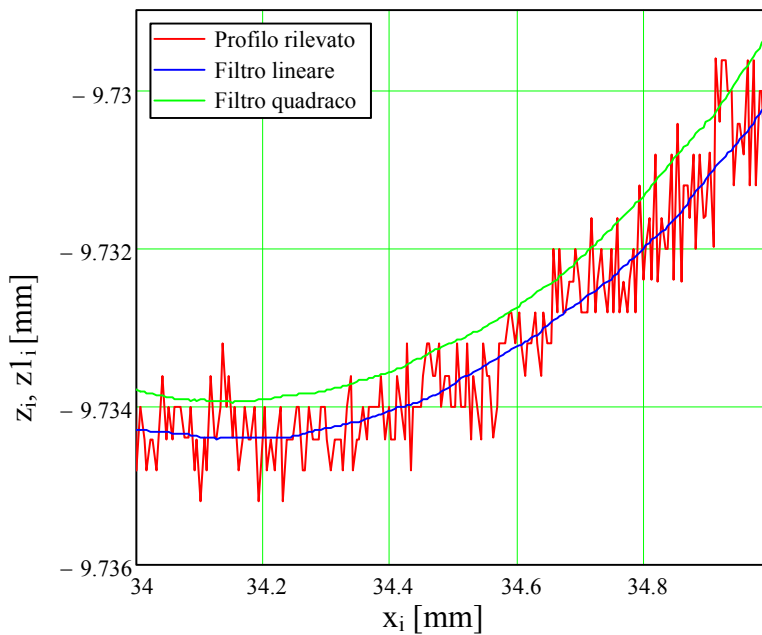
Il terzo metodo, che utilizza lo stesso metodo di fitting descritto nel secondo metodo, va a determinare la curvatura, tramite la (14), direttamente sul punto  $i$ -esimo, le cui coordinate sono definite dalla funzione (29).

### III.1.3.1 Valutazione dei metodi

Una prima valutazione dei metodi proposti può essere fatta analizzando il rumore filtrato con i metodi di fitting proposti; per fare questo partiamo da un profilo rilevato con profilometro (figura 23) e andiamo a calcolare i valori corrispondenti, dopo aver applicato i rispettivi metodi di fitting su un numero di punti pari a  $2k+1=201$  (figura 24).



**Figura 23** Profilo di una lente rettificata rilevato con profilometro a tastatore.

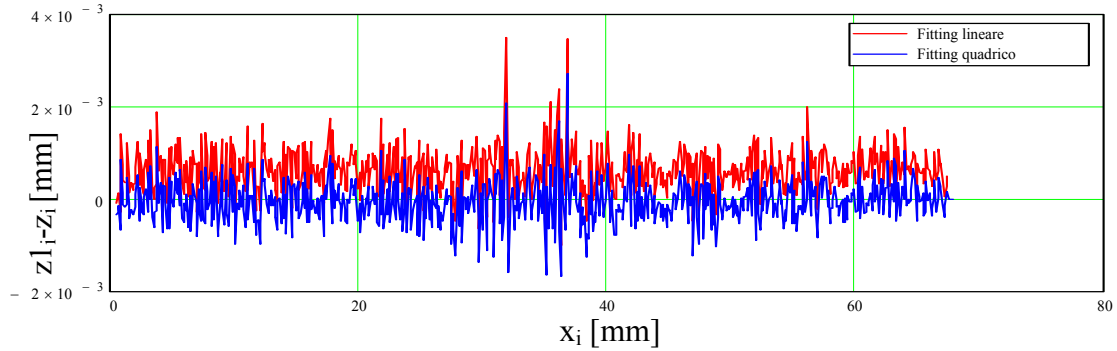


**Figura 24** Rappresentazione di un tratto del profilo rilevato, del profilo di fitting lineare e del profilo di fitting polinomiale di secondo ordine.

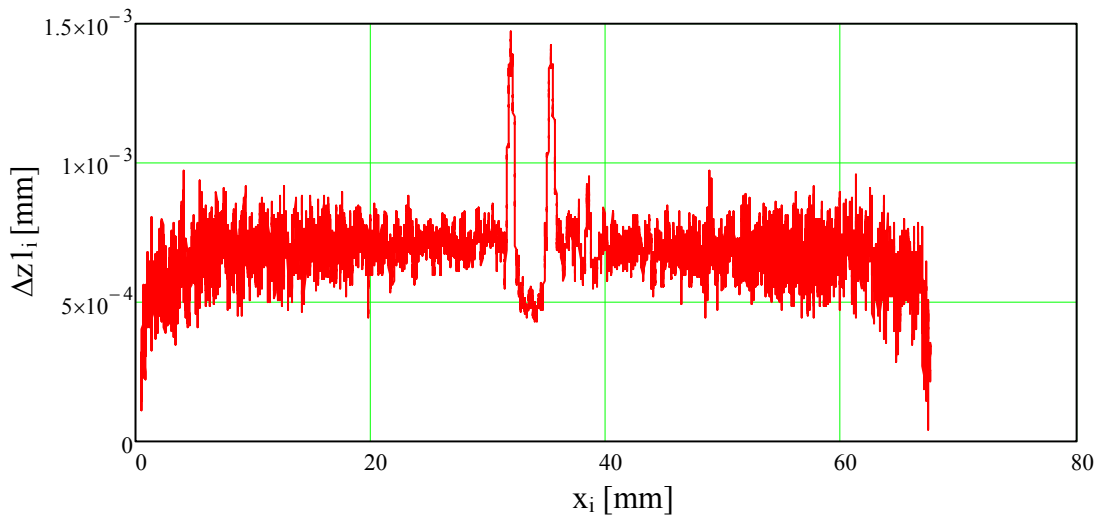
Se si analizzano gli scostamenti dei profili di fitting rispetto al profilo misurato (figura 25) ci si rende conto che applicando un fitting locale lineare gli scostamenti risultano essere mediamente positivi; questo fatto può essere spiegato considerando che il profilo esaminato risulta essere concavo. In particolare, dalla figura 26 si può notare che la differenza tra le



coordinate  $z$  ottenute con i due metodi fitting presenta una media pari a circa  $0.7 \mu\text{m}$ . Si può quindi concludere che l'impiego del fitting lineare locale, pur essendo computazionalmente più semplice, introduce un errore legato alla curvatura della superficie.



**Figura 25** Differenze tra il profilo di fitting lineare e il profilo rilevato, e differenza tra il profilo di fitting quadratico e il profilo rilevato.

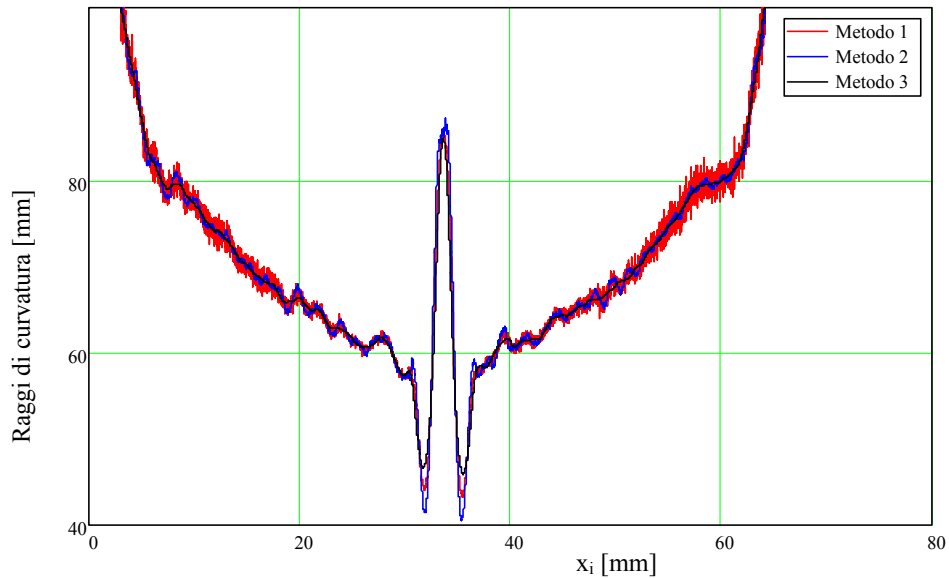


**Figura 26** Differenza tra profili ottenuti rispettivamente con fitting lineare e quadratico.

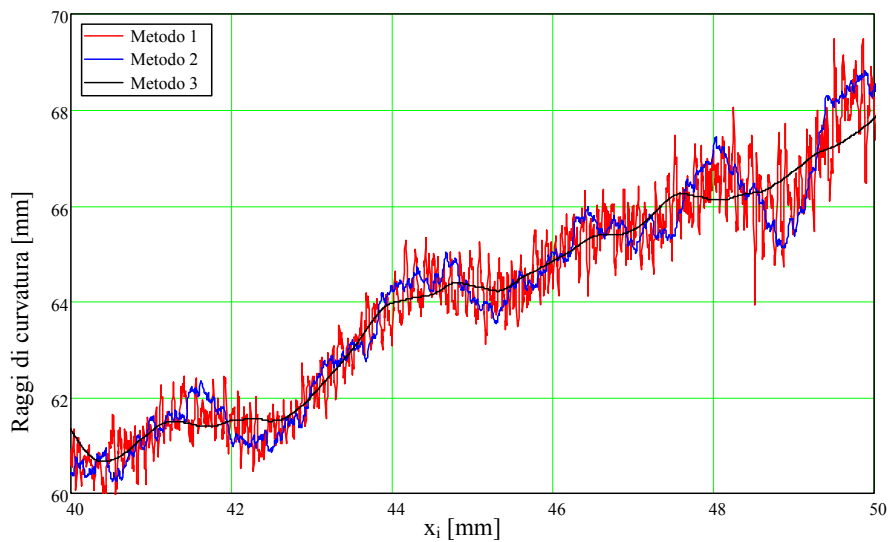
Per discriminare il metodo di analisi più adeguato alla circostanza, possiamo valutare la curvatura locale su uno stesso profilo, ottenuta impiegando uno stesso intervallo di punti; scegliamo ad esempio per i primi due metodi un intervallo pari a  $2k+2n+1$  ( $k=100$ ,  $n=200$ ) punti successivi, mentre per il terzo un intervallo che utilizza  $2k+1$  ( $k=300$ ) punti successivi (andremo cioè a determinare la curvatura su 601 punti successivi).

Osservando la figura 27 e la figura 28 si può notare che il primo metodo per la stima di curvatura risulta molto sensibile al rumore della profilo (in questo caso dato dalla rugosità e

dall'ondulazione derivanti dalla lavorazione di rettifica), mentre il terzo metodo fornisce dei risultati che risentono meno dell'impronta della lavorazione.



**Figura 27** Raggi di curvatura calcolati su un medesimo profilo determinati impiegando i tre metodi proposti.



**Figura 28** Raggi di curvatura calcolati su un medesimo profilo determinati impiegando i tre metodi proposti su un tratto di profilo pari a 10 mm.

Dall'analisi dei risultati ottenuti, possiamo dire che il metodo che più si addice all'analisi di curvatura di una superficie ottica è sicuramente il terzo in quanto tali superfici presentano

generalmente variazioni di curvatura regolari. Inoltre risulta computazionalmente più prestante rispetto al secondo metodo. Assolutamente da scartare risulta il primo metodo proposto, in quanto rileva un'elevata sensibilità al rumore e introduce un errore sul fitting legato alla concavità della superficie.

### III.1.4 Sviluppo di strumenti per l'analisi della curvatura di superfici definite da nuvole di punti

Per quanto riguarda l'analisi di curvatura di superfici discretizzate è stato sviluppato un metodo basato sul fitting locale ai minimi quadrati mediante una polinomiale di secondo grado. L'esigenza di sviluppare questo strumento è legata ai limiti degli applicativi software disponibili in commercio per l'analisi di curvatura di modelli fisici acquisiti con macchina di misura a coordinate e di modelli virtuali discretizzati; infatti questi non lasciano libertà all'operatore di stabilire l'ampiezza della zona usata per calcolare le proprietà desiderate, non forniscono una stima sulla accuratezza dei risultati restituiti e il metodo utilizzato per la determinazione delle caratteristiche cercate non è comunque dichiarato.

La struttura della procedura implementata per l'analisi di curvatura è sintetizzata schematicamente in figura 29; per ottenere le proprietà ottiche della superficie dalle curvature della stessa, è possibile ricorrere alle semplici relazioni riportate nel paragrafo III.1.5 .

I dati di ingresso sono costituiti da una nuvola di punti in formato ascii (file di testo che ha per colonne le coordinate cartesiane dei punti della superficie separate da tabulazione), che può essere ottenuta da un prototipo virtuale o rilevata una superficie fisica con tecniche di reverse engineering.

Prima di effettuare l'analisi dei dati acquisiti si costruisce una griglia sui nodi della quale si va successivamente a calcolare la curvatura (figura 30); tale griglia, costruita sul piano x-y, sarà limitata da un diametro massimo di analisi (grid size) e avrà un passo costante (grid step).

Su ogni nodo della griglia viene selezionato l'insieme di punti (local set point) le cui coordinate x-y stanno all'interno di un intorno del nodo di diametro fissato (size of the local point set *slps*). Su questi punti si costruisce una quadrica di fitting (local quadratic function).

$$(31) \quad z(x,y) = a \cdot x^2 + b \cdot y^2 + c \cdot x \cdot y + d \cdot x + e \cdot y + f$$

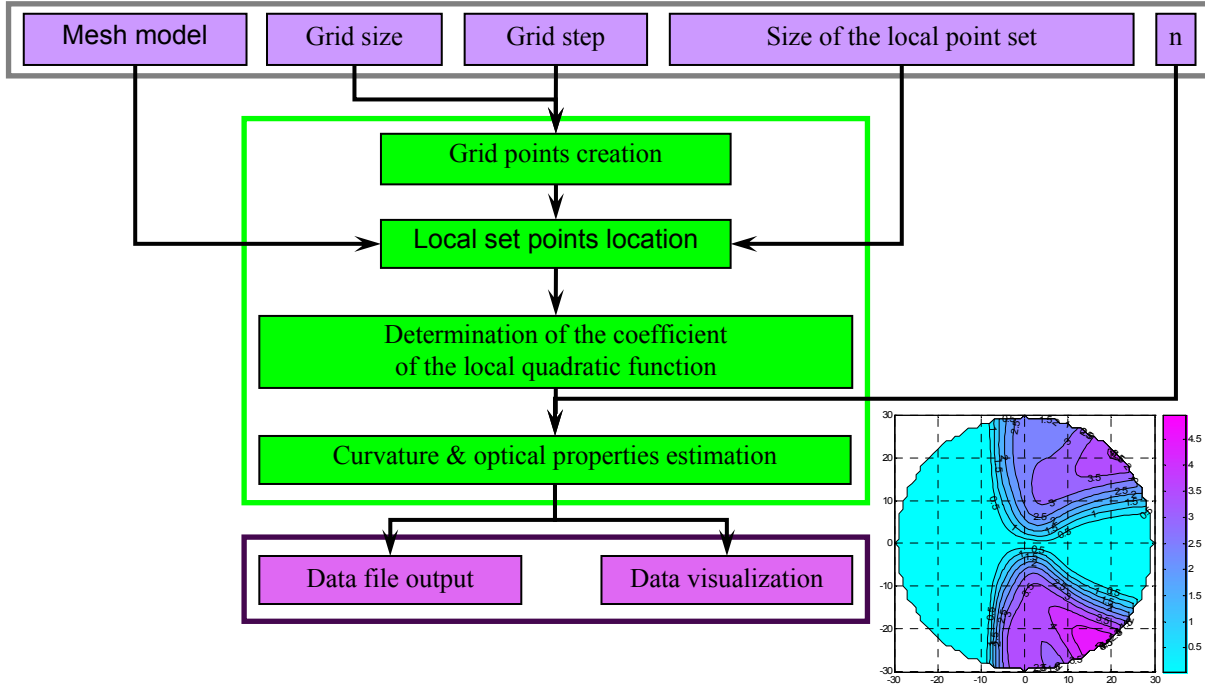


Figura 29 Diagramma di flusso della procedura implementata per l'analisi di curvatura.

Per calcolare i coefficienti della polinomiale si ricorre al metodo dei minimi quadrati; si devono quindi in primo luogo determinare le distanze dei punti selezionati dalla quadrica

$$(32) \quad d_i = z(x_i, y_i) - z_i = a \cdot (x_i)^2 + b \cdot (y_i)^2 + c \cdot x_i \cdot y_i + d \cdot x_i + g \cdot y_i + f - z_i,$$

e quindi si determinano i coefficienti  $a, b, \dots, f$  in modo tale che la somma dei quadrati delle distanze sia minima. Questo risultato si ottiene imponendo che le derivate prime della funzione che rappresenta la somma dei quadrati delle distanze, fatte rispetto ai coefficienti  $a, b, \dots, f$ , siano pari a zero:

$$(33) \quad \begin{aligned} \frac{d}{da} \sum_{i=1}^n [a \cdot (x_i)^2 + b \cdot (y_i)^2 + c \cdot x_i \cdot y_i + d \cdot x_i + g \cdot y_i + f - z_i]^2 &= 0 \\ \frac{d}{db} \sum_{i=1}^n [a \cdot (x_i)^2 + b \cdot (y_i)^2 + c \cdot x_i \cdot y_i + d \cdot x_i + g \cdot y_i + f - z_i]^2 &= 0 \\ \dots \\ \frac{d}{df} \sum_{i=1}^n [a \cdot (x_i)^2 + b \cdot (y_i)^2 + c \cdot x_i \cdot y_i + d \cdot x_i + g \cdot y_i + f - z_i]^2 &= 0 \end{aligned}$$

Ciò equivale a risolvere il sistema lineare:

$$(34) \quad \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \\ d \\ e \\ f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^n x_i^4 & \sum_{i=1}^n x_i^2 y_i^2 & \sum_{i=1}^n x_i^3 y_i & \sum_{i=1}^n x_i^3 & \sum_{i=1}^n x_i^2 y_i & \sum_{i=1}^n x_i^2 & \sum_{i=1}^n x_i^2 z_i \\ \sum_{i=1}^n x_i^2 y_i^2 & \sum_{i=1}^n y_i^4 & \sum_{i=1}^n x_i y_i^3 & \sum_{i=1}^n x_i y_i^2 & \sum_{i=1}^n y_i^3 & \sum_{i=1}^n y_i^2 & \sum_{i=1}^n y_i^2 z_i \\ \sum_{i=1}^n x_i^3 y_i & \sum_{i=1}^n x_i y_i^3 & \sum_{i=1}^n x_i^2 y_i^2 & \sum_{i=1}^n x_i^2 y_i & \sum_{i=1}^n x_i y_i^2 & \sum_{i=1}^n x_i y_i & \sum_{i=1}^n x_i y_i z_i \\ \sum_{i=1}^n x_i^3 & \sum_{i=1}^n x_i y_i^2 & \sum_{i=1}^n x_i^2 y_i & \sum_{i=1}^n x_i^2 & \sum_{i=1}^n x_i y_i & \sum_{i=1}^n x_i & \sum_{i=1}^n x_i z_i \\ \sum_{i=1}^n x_i^2 y_i & \sum_{i=1}^n y_i^3 & \sum_{i=1}^n x_i y_i^2 & \sum_{i=1}^n x_i y_i & \sum_{i=1}^n y_i^2 & \sum_{i=1}^n y_i & \sum_{i=1}^n y_i z_i \\ \sum_{i=1}^n x_i^2 & \sum_{i=1}^n y_i^2 & \sum_{i=1}^n x_i \cdot y_i & \sum_{i=1}^n x_i & \sum_{i=1}^n y_i & n & \sum_{i=1}^n z_i \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^n x_i^2 z_i \\ \sum_{i=1}^n y_i^2 z_i \\ \sum_{i=1}^n x_i y_i z_i \\ \sum_{i=1}^n x_i z_i \\ \sum_{i=1}^n y_i z_i \\ \sum_{i=1}^n z_i \end{bmatrix}$$

dove  $x_i$ ,  $y_i$ , e  $z_i$  rappresentano le coordinate cartesiane dei punti, mentre  $n$  è il numero di punti contenuti nell'intorno fissato del nodo.

A questo punto, ricorrendo alle relazioni presentate nel paragrafo III.1.1 e risolvendo la (22) è possibile calcolare la curvatura massima e minima, dove si è posto:

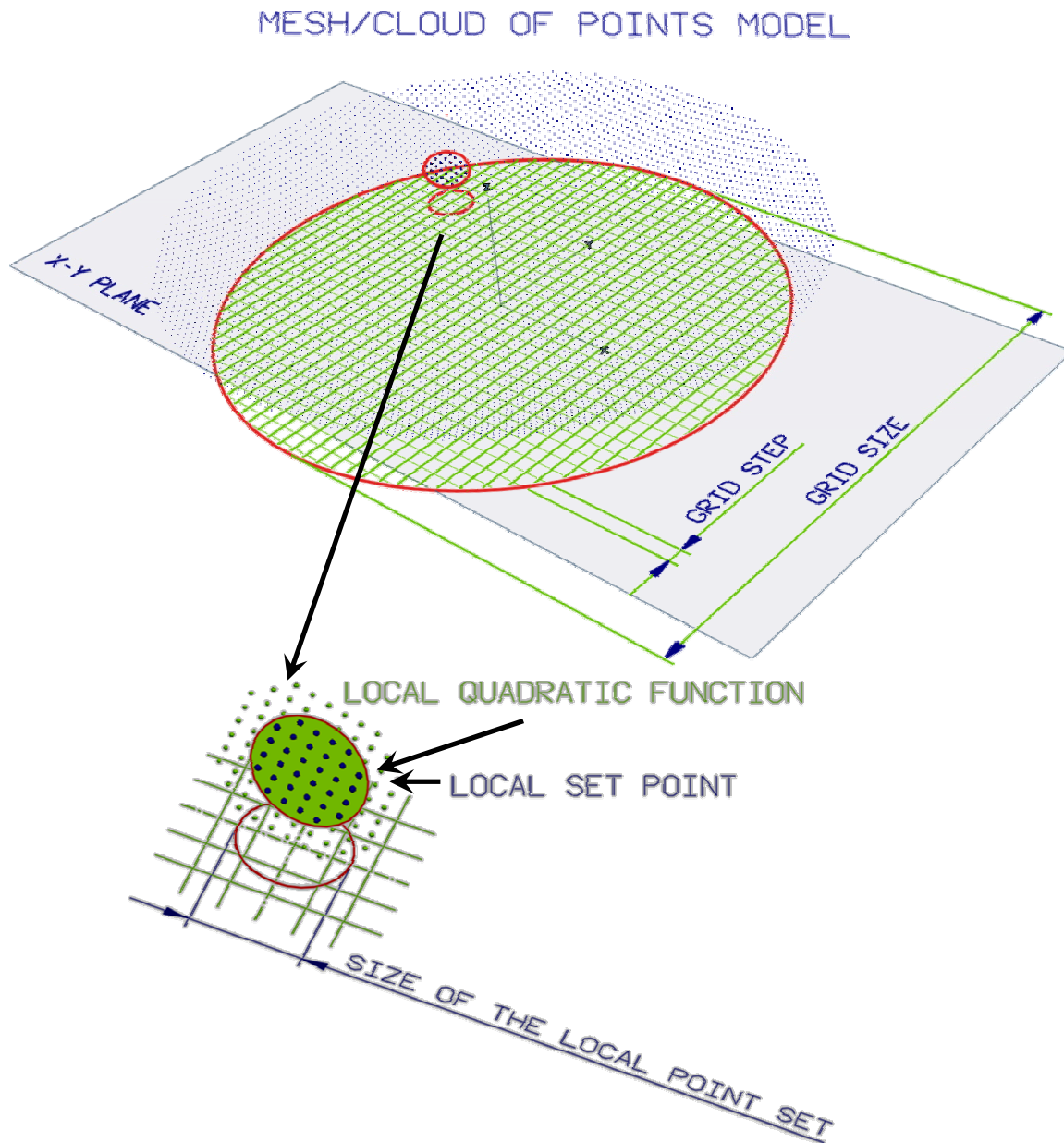
$$(35) \quad x(u,v) = u, \quad y(u,v) = v, \quad z(u,v) = a \cdot u^2 + b \cdot v^2 + c \cdot u \cdot v + d \cdot u + e \cdot v + f$$

Una trattazione più esaustiva è disponibile in [51] e [52], dove è possibile reperire il codice del programma sviluppato in ambiente Matlab e i metodi impiegati per quel che riguarda la valutazione della precisione degli algoritmi implementati.

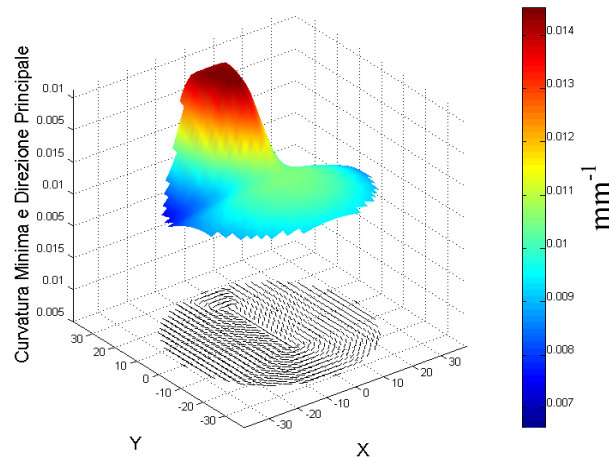
Gli output previsti dall'applicativo sviluppato sono:

- un file di testo contenente le coordinate  $x$ ,  $y$  dei nodi della griglia, la curvatura minima e massima, le direzioni principali e il potere massimo minimo e medio calcolato secondo le relazioni presentate nel paragrafo III.1.5 ,
- le mappe bidimensionali (con curve isolivello) e tridimensionali di curvatura, direzioni principali, potere e astigmatismo di cui si riporta un esempio in figura 31.

Le medesime proprietà ottico-geometriche possono essere ottenute utilizzando come nodi della griglia i punti di un segmento, giacente sul piano  $x, y$ , di estremi fissati; questa particolarizzazione dei risultati risulta molto utile nella valutazione del canale di lenti progressive.



**Figura 30** Identificazione della griglia sui nodi della quale si calcola la curvatura, dopo aver selezionato i punti (local set point) per la costruzione della quadrica di fitting locale.



**Figura 31 Esempio di mappa tridimensionale della curvatura minima con la relativa direzione principale.**

#### **III.1.4.1 Validazione**

Per validare l'applicativo sviluppato si sono adottati una serie di elementi geometrici (test case di tabella 1) dalle caratteristiche di curvatura note; su questi test case si sono determinati i valori massimi, minimi, medi e le deviazione standard, degli errori commessi nella valutazione della curvatura massima, minima, media, della differenza tra le curvature principali e delle direzioni principali.

Riportiamo di seguito una sintesi dei risultati ottenuti, con i metodi proposti in [51] e [52] dove è presente una trattazione più esaustiva dei risultati.

I modelli indagati hanno presentato errori massimi inferiori allo 0.1%. In particolare si è notato che l'errore commesso, al variare del campionamento della superficie e a parità di altri parametri, risulta essere del tutto casuale; si è quindi portati a pensare che i risultati ottenuti siano indipendenti dal campionamento della superficie e che sia sufficiente che il numero di punti per la costruzione della quadrica di fitting sia maggiore di 6.

Gli errori relativi presentano in generale:

- un andamento proporzionale al quadrato del diametro dell'intorno del nodo della griglia utilizzato per individuare i punti sui quali fare il fitting (size of the local point set *slps*):

$$(36) \quad \varepsilon_r \propto slps^2,$$

- un andamento proporzionale al quadrato della curvatura del modello:

$$(37) \quad \varepsilon_r \propto \chi^2,$$

- un andamento pressoché cosante se il prodotto tra curvatura e diametro dell'intorno non varia:

$$(38) \quad \text{slps}'\chi' = \text{slps} \cdot \chi \Rightarrow \varepsilon(\text{slps}'\chi') \cong \varepsilon(\text{slps} \cdot \chi).$$

Parametri di curvatura	Superfici valutate	Parametri di calcolo indagati		
		Raggio di curvatura [mm]	slps [mm]	Campionamento [mm]
K1 K2 H K1-K2	Sfera	40÷4000	1÷10	0.1÷1
	Cilindro	40÷4000	1÷10	0.1÷1
	Toro	a=40÷4000, r=4000-a	1÷10	0.1÷1
	Superfici atoriche	r1=100÷1000 r2=100÷1000 p1=-2÷2, p2=1	4	0.5
Direzioni principali	Toro	a=40÷4000, r=4000-a	1÷10	0.1÷1

**Tabella 1 Test case impiegati per la validazione dell'applicativo di analisi di curvatura.**

È stato inoltre eseguito un primo studio per quel che riguarda l'effetto del rumore legato ai metodi di acquisizione o simulato e si sono sviluppati degli algoritmi di smoothing basati su algoritmi di fitting ai minimi quadrati e sull'eliminazione degli outlier con il metodo dei quartili. Anche in questo caso per un approfondimento sul metodo sviluppato e sulla sua validazione è possibile fare riferimento a [52].

### III.1.5 Stima delle proprietà ottiche attraverso l'analisi di curvatura

In prima approssimazione, ricorrendo all'ottica parassiale, è possibile stimare il potere di una lente valutando esclusivamente la curvatura delle due superfici. In questo caso è necessario definire il potere delle due superfici in funzione dei raggi di curvatura delle stesse. Attraverso le seguenti relazioni:

$$(39) \quad P_f = \frac{(n-1)}{R_f},$$



$$(40) \quad P_b = -\frac{(n-1)}{R_b},$$

è possibile definire il potere della superficie anteriore  $P_f$  e il potere della superficie posteriore  $P_b$ , dove  $R_f$  e  $R_b$  rappresentano i rispettivi raggi di curvatura ed  $n$  l'indice di rifrazione.

Dai poteri delle singole superfici è possibile, trascurando lo spessore della lente, determinare il potere della lente attraverso una semplice somma del potere della superficie anteriore e della superficie posteriore:

$$(41) \quad P = P_f + P_b.$$

Nel caso in cui non si voglia trascurare l'influenza dello spessore è possibile ricorrere alla seguente formulazione:

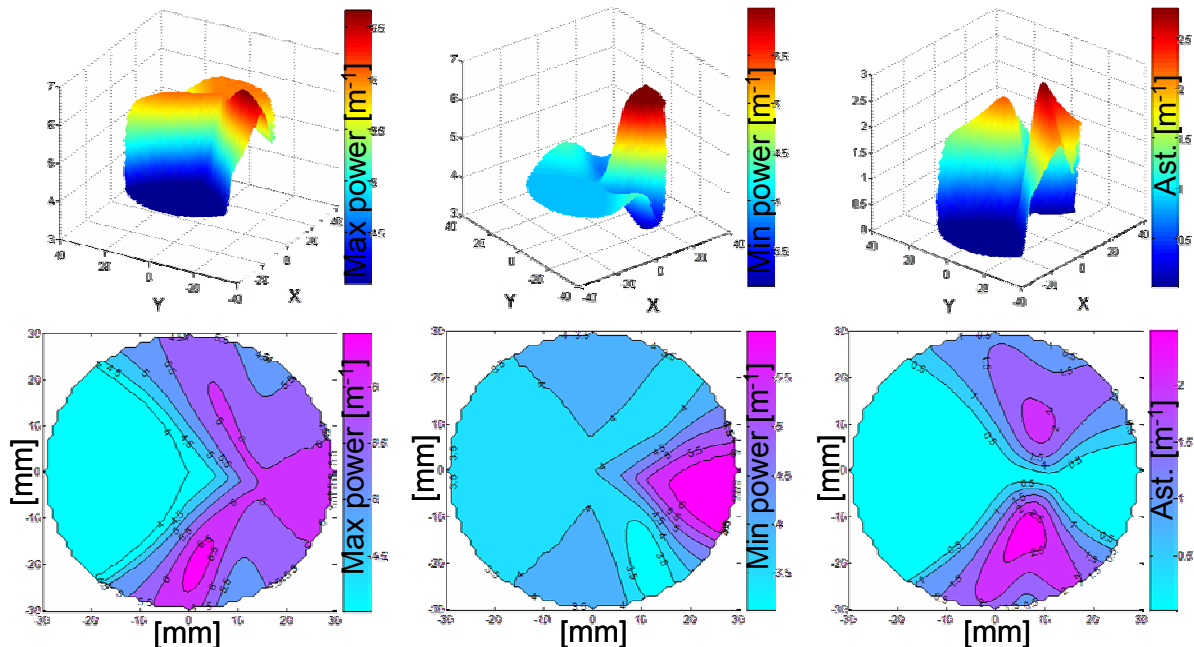
$$(42) \quad P_v = \frac{P_f}{1 - P_f \cdot \frac{t}{n}} + P_b,$$

dove  $P_{bv}$  è il potere della lente misurato rispetto alla superficie posteriore della stessa (potere frontale posteriore) e  $t$  è lo spessore della lente.

Questo tipo di formulazione risulta molto utile nella valutazione di lenti a potere progressivo, dove la superficie che garantisce la variazione di potere presenta una curvatura differente in ogni suo punto. In questo caso, in ogni punto della singola superficie, è possibile ottenere le due curvature principali  $\chi_1$  ed  $\chi_2$  che possono essere tradotte nel potere massimo  $P_{max}$  e nel potere minimo  $P_{min}$  della superficie attraverso relazioni analoghe alle (39) e (40); la differenza tra i due poteri calcolati va a definire l'astigmatismo, mentre la direzione principale della curvatura definisce l'asse dell'astigmatismo. A titolo esemplificativo riportiamo in figura 32 l'analisi delle proprietà ottiche di una lente a potere progressivo.

Per quanto riguarda il diametro dell'intorno del nodo della griglia utilizzato per individuare i punti sui quali fare il fitting (slps), bisogna tenere in considerazione che un suo aumento, se da un lato consente un'attenuazione della rumorosità della superficie e quindi un effetto di smoothing sulla mappa di curvatura, dall'altro introduce un maggiore errore nella valutazione delle proprietà ottiche. Questo risulta particolarmente evidente nell'analisi di

superfici di prototipi fisici come evidenziato dalla figura 33. In casi come questo risulta utile procedere ad un filtraggio preliminare della superficie, prima di passare all'analisi della curvatura.



**Figura 32 Esempio di mappe di potere e astigmatismo di una lente a potere progressivo, ottenute con l'applicativo sviluppato.**

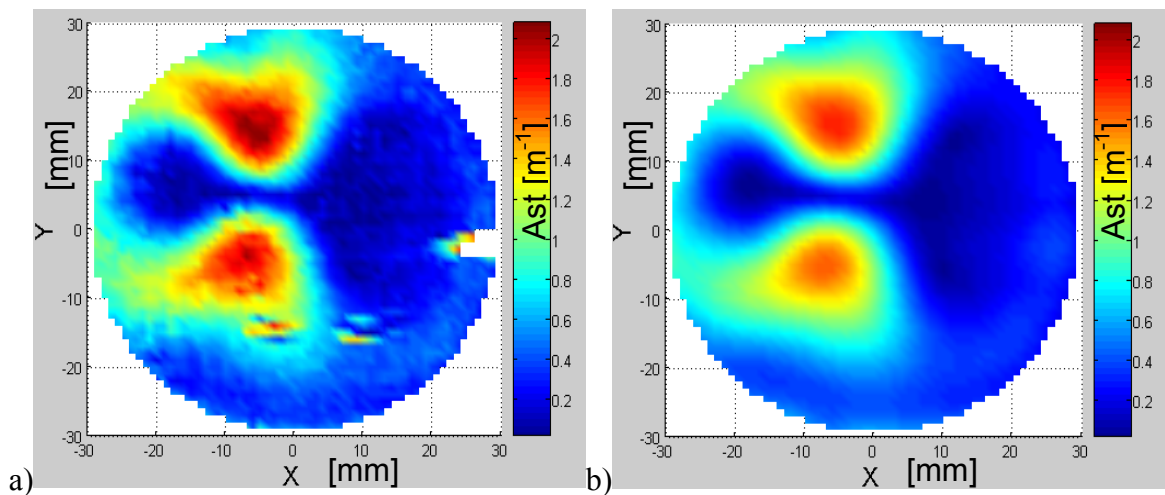
D'altro canto, nella valutazione delle proprietà ottiche, risulta utile impiegare una dimensione dell'intorno del nodo sul quale si va a calcolare la curvatura pari al diametro della superficie impiegata dall'occhio in una determinata posizione. In questo l'analisi effettuata assume un significato equivalente alla valutazione dell'effetto delle proprietà ottiche in funzione della posizione angolare dell'occhio.

### **III.2 Ray tracing**

Il ray tracing, noto come strumento per la rappresentazione fotorealistica di oggetti virtuali, è applicato in svariati campi scientifici come nello studio della propagazione delle onde elettromagnetiche, l'acustica e l'ottica. Nel presente capitolo viene descritto un modulo software per l'analisi delle proprietà ottiche di lenti oftalmiche che utilizza algoritmi basati ray tracing; lo stesso modulo può essere utile nella progettazione della lente in quanto

consente un'ottimizzazione della geometria della stessa. Lo sviluppo dello strumento descritto nasce dalla necessità di disporre di un software che, a differenza di quelli commerciali noti all'autore, risulti specifico per l'ottica oftalmica, flessibile e che garantisca una modellazione-analisi della lente di elevata precisione ed interfacciabile con gli strumenti CAM sviluppati [53] che verranno descritti nel capitolo successivo.

Va ricordato inoltre che in letteratura vengono riportati diagrammi di supporto alla progettazione che definiscono la geometria ottimale della lente [17], [20]. Tuttavia i risultati rappresentati sono ottenuti impiegando metodi di ray tracing approssimati basati su due ipotesi semplificative fondamentali: a) lente sottile, b) stima delle aberrazioni limitate alla teoria del terzo ordine.



**Figura 33 Effetto del diametro dell'intorno del nodo della griglia utilizzato per individuare i punti sui quali fare il fitting sulla mappa di astigmatismo di un prototipo fisico di lente progressiva acquisita con CMM a tastatore: a) mappa ottenuta con  $slps = 2$  mm, b) mappa ottenuta con  $slps = 8$  mm.**

Grazie allo sviluppo degli algoritmi di ray tracing è possibile ottimizzare in fase di progettazione la scelta dei parametri che definiscono la geometria della lente al fine di minimizzare l'astigmatismo o, a discrezione, la dimensione della macchia di confusione (equivalente ad annullare l'errore obliquo medio come descritto ne capito II) senza dover ricorrere alle approssimazioni sopra esposte.

### III.2.1 Struttura degli algoritmi sviluppati per la valutazione delle proprietà ottiche

Tipicamente impiegato in computer grafica 3D come algoritmo di rendering [54], il ray tracing viene in questo caso utilizzato come strumento per la progettazione e l'analisi della qualità di sistemi ottici ed in particolare delle lenti oftalmiche, al fine di superare le approssimazioni introdotte dall'utilizzo delle tecniche di progettazione ed analisi precedentemente citate.

La struttura degli algoritmi implementati è rappresentata in figura 34. Definita la geometria del sistema occhio-lente e le relative proprietà ottiche desiderate, viene tracciato un raggio (raggio principale) per identificare la direzione dalla quale provengono i raggi che andranno a costituire l'immagine sul centro della retina, in particolare al centro di essa dove è posizionata la fovea, parte della stessa che presenta il maggior addensamento degli organi atti alla percezione delle immagini.

Successivamente si procede tracciando dei raggi per l'individuazione della pupilla di entrata (immagine della pupilla fornita dalla lente). Solo i raggi che attraversano la pupilla di entrata vanno successivamente ad attraversare la pupilla dell'occhio [11].

Sulla pupilla di entrata viene costruita una griglia, sui nodi della quale vengono fatti passare i raggi, provenienti dall'infinito e paralleli alla direzione prima identificata nel caso si desideri progettare una lente per la visione da lontano, o da un punto che giace sul raggio principale e che dista solitamente 40 cm dal centro di rotazione dell'occhio nel caso in cui si desideri progettare una lente per la visione da vicino.

Una volta tracciati i raggi è possibile valutare le prestazioni della lente e stabilire se le caratteristiche ottiche individuate sono adeguate, se cioè la lente presenta un astigmatismo nullo per un determinato angolo di rotazione dell'occhio, oppure se si è in una condizione di minimo per quel che riguarda la dimensione dello spot diagram. In caso contrario si procede modificando il coefficiente di asfericità ed eseguendo nuovamente il tracciamento dei raggi e l'analisi dei risultati finché non si ottiene una soluzione soddisfacente.

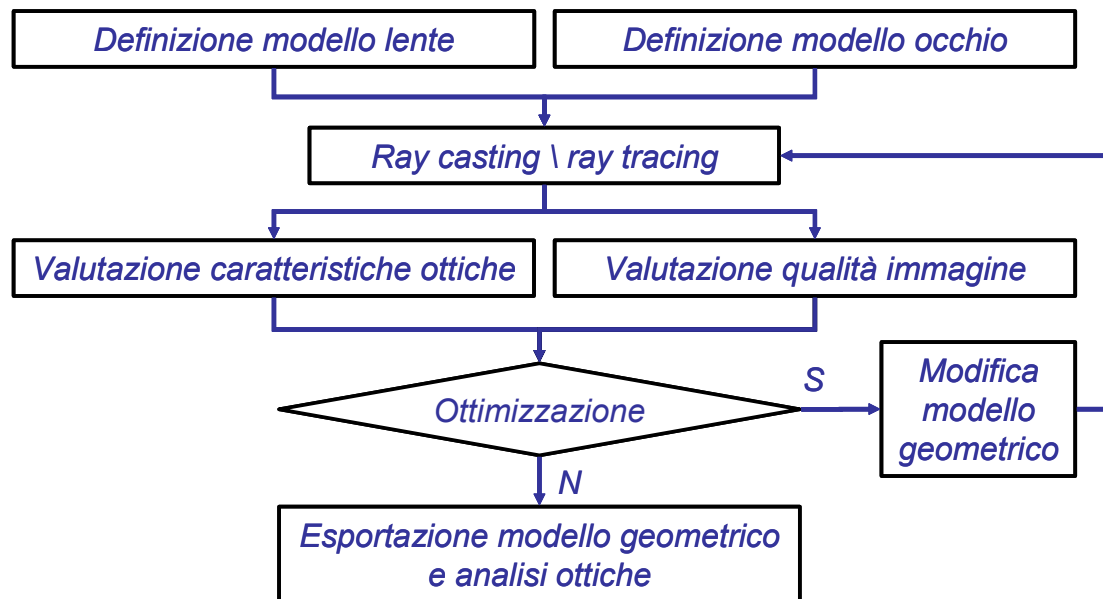


Figura 34 Diagramma di flusso degli algoritmi implementati per lo sviluppo del software di ray tracing.

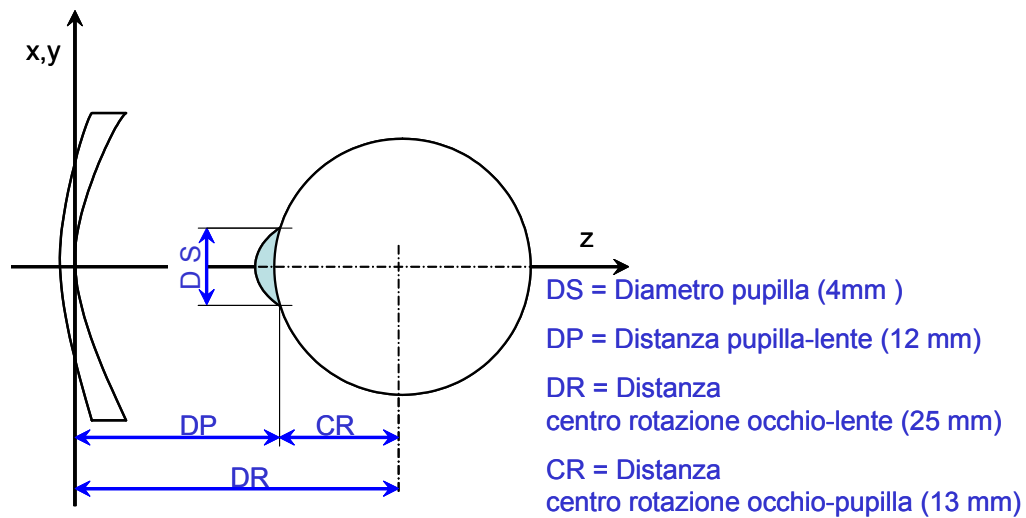
### III.2.1.1 La lente e l'occhio

Dalle relazione che fornisce il poter frontale posteriore (3) della lente, una volta che siano stabiliti l'indice di rifrazione del materiale impiegato, lo spessore al centro e la curvatura di una delle due superfici (superficie base) della lente, è possibile determinare il raggio di curvatura dell'altra superficie.

Noti i raggi di curvatura, lo spessore al centro e i coefficienti di asfericità di primo tentativo o quelli ottenuti dopo l'ottimizzazione, le superfici della lente vengono rappresentate attraverso mesh poliedriche campionando la funzione (6) o (7) in modo da garantire una distanza cordale trascurabile; la superficie è discretizzata attraverso triangoli per ciascuno dei quali sono note le coordinate dei vertici e le componenti della normali della superficie valutate sugli stessi.

Si definiscono inoltre le dimensioni caratteristiche dell'occhio [13] (figura 35) e la disposizione nello spazio della lente rispetto allo stesso.

Per valutare le proprietà ottiche della lente in funzione dell'angolo di rotazione dell'occhio vengono applicate al modello poliedrico della lente una serie di rotazioni successive, ottenendo risultati equivalenti ma computazionalmente più agevoli.



**Figura 35 Disposizione del sistema occhio-lente e dimensioni caratteristiche tipicamente impiegate nella progettazione di lenti oftalmiche.**

### *III.2.1.2 Tracciamento dei raggi*

I raggi tracciati (figura 36) servono per:

- individuare la direzione del raggio principale,
- individuare la pupilla di entrata valutando l'immagine di 8 punti che stanno sulla pupilla dell'occhio equispaziati angularmente di  $45^\circ$ ,
- tracciare i raggi sulla griglia creata sulla pupilla di entrata che effettivamente vengono utilizzati per determinare le caratteristiche ottiche della lente.

Va menzionato che la dimensione della pupilla di entrata viene leggermente maggiorata per garantire la completa copertura della pupilla da parte dei raggi anche in caso di rotazione dell'occhio; i raggi che eventualmente escono dalla pupilla dell'occhio vengono cancellati successivamente.

Ogni qualvolta un raggio intersechi una superficie della lente si deve individuare la propagazione dello stesso dopo la rifrazione. Per far questo si deve:

- individuare il triangolo intersecato dal raggio,
- individuare il punto di intersezione sul triangolo e la normale in quel punto come media pesata delle normali ai vertici dello stesso (algoritmo di Gouraud) [54],
- applicare le legge di Snell in forma vettoriale (2).



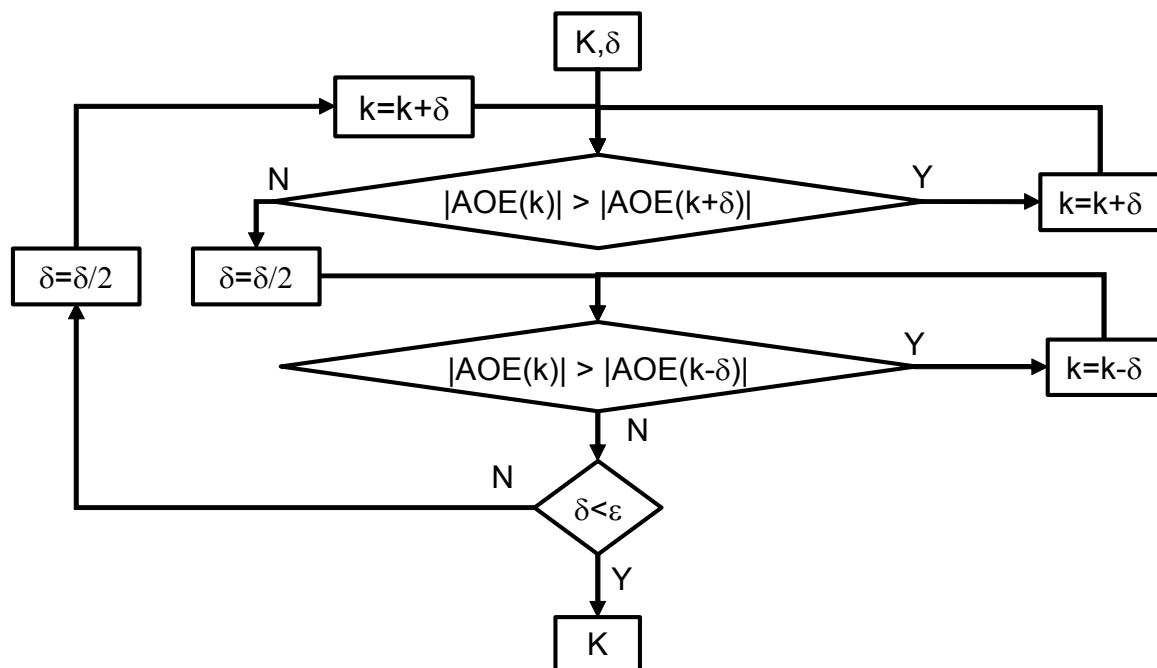
### *III.2.1.3 Valutazioni delle prestazioni della lente*

Gli algoritmi implementati per la valutazione della posizione dell'immagine si basano sull'individuazione di un raggio medio, rispetto al quale sono misurate le distanze dei raggi tracciati in un piano ortogonale al raggio principale; si stabilisce che la posizione del piano immagine sia data dalla coordinata  $z$  che rende minima la somma dei quadrati delle distanze dei raggi tracciati che entrano nella pupilla, dal raggio medio. Una volta determinata la posizione dell'immagine è possibile rappresentare la macchia di confusione come intersezione dei raggi tracciati con il piano immagine. Per la determinazione dell'immagine tangenziale e sagittale si procede allo stesso modo prendendo in considerazione solo i raggi che giacciono nel piano sagittale o nel piano tangenziale. Tali grandezze sono determinate in diverse configurazioni di rotazione dell'occhio e vanno a definire quelli che tipicamente vengono chiamati diagrammi di campo [7].

### *III.2.1.4 Ottimizzazione della geometria*

L'ottimizzazione della geometria consiste nell'individuare il coefficiente di asfericità di una delle due superfici che, per un determinato angolo di rotazione dell'occhio, garantisce l'annullamento dell'errore obliquo astigmatico o la minimizzazione del raggio quadratico della macchia di confusione. Partendo da un valore di primo tentativo del coefficiente di asfericità  $p$  della lente (che può essere stimato con i metodi descritti nel capitolo II), si determina la caratteristica ottica da ottimizzare e si confronta con quella di una lente che, a parità di altri parametri costruttivi, abbia con un coefficiente di asfericità  $p' = p - \delta$  (es.  $\delta = 1$ ) rispetto al coefficiente di primo tentativo. Quindi si procede diminuendo il coefficiente di asfericità di  $\delta$  finché la caratteristica da ottimizzare non peggiora. Si dimezza  $\delta$  e si incrementa il coefficiente di asfericità di  $\delta$  finché la caratteristica da ottimizzare non peggiora; si dimezza il passo e si procede iterativamente. L'iterazione viene bloccata quando  $\delta$  è inferiore ad un valore prefissato garantendo una stima del coefficiente di asfericità con la precisione desiderata. In figura 38 è riportato lo schema a blocchi della procedura eseguita per determinare il coefficiente di asfericità che minimizza l'errore obliquo astigmatico.





**Figura 38 Schema a blocchi che illustra la modalità impiegata per la determinazione del coefficiente di asfericità che minimizza l'errore obliquo astigmatico.**

### *III.2.1.5 Output previsti*

Riportiamo di seguito i principali output ottenibili con gli algoritmi implementati, in funzione dell'angolo di rotazione dell'occhio, per una lente di potere nominale 4.50 D in funzione dell'angolo di rotazione dell'occhio, avente raggio di curvatura della superficie anteriore 68.88 mm, raggio di curvatura della superficie posteriore 177 mm, spessore al centro 4.7 mm, indice di rifrazione 1.498, campionamento della mesh 0.2 mm, con circa 300 raggi tracciati.

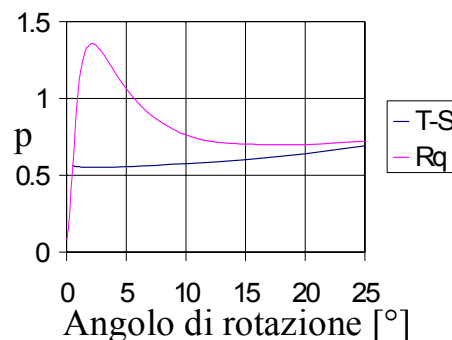
Dagli algoritmi di ottimizzazione della geometria è possibile determinare il coefficiente di asfericità che minimizza l'errore obliquo astigmatico (curva T-S di figura 39) o il raggio quadratico medio della macchia di confusione (curva Rq di figura 39) in funzione dell'angolo di rotazione dell'occhio.

Assumendo una configurazione per il sistema occhio-lente (negli esempi che seguono rappresentato nella figura 35), un oggetto posto a 400 mm dal centro di rotazione dell'occhio e un coefficiente di asfericità per la superficie anteriore pari a 0.603 che annulla la differenza

tra immagine tangenziale e sagittale (OAE) per un angolo di rotazione dell'occhio pari a  $15^\circ$  è possibile determinare e rappresentare al variare dell'angolo di rotazione dell'occhio:

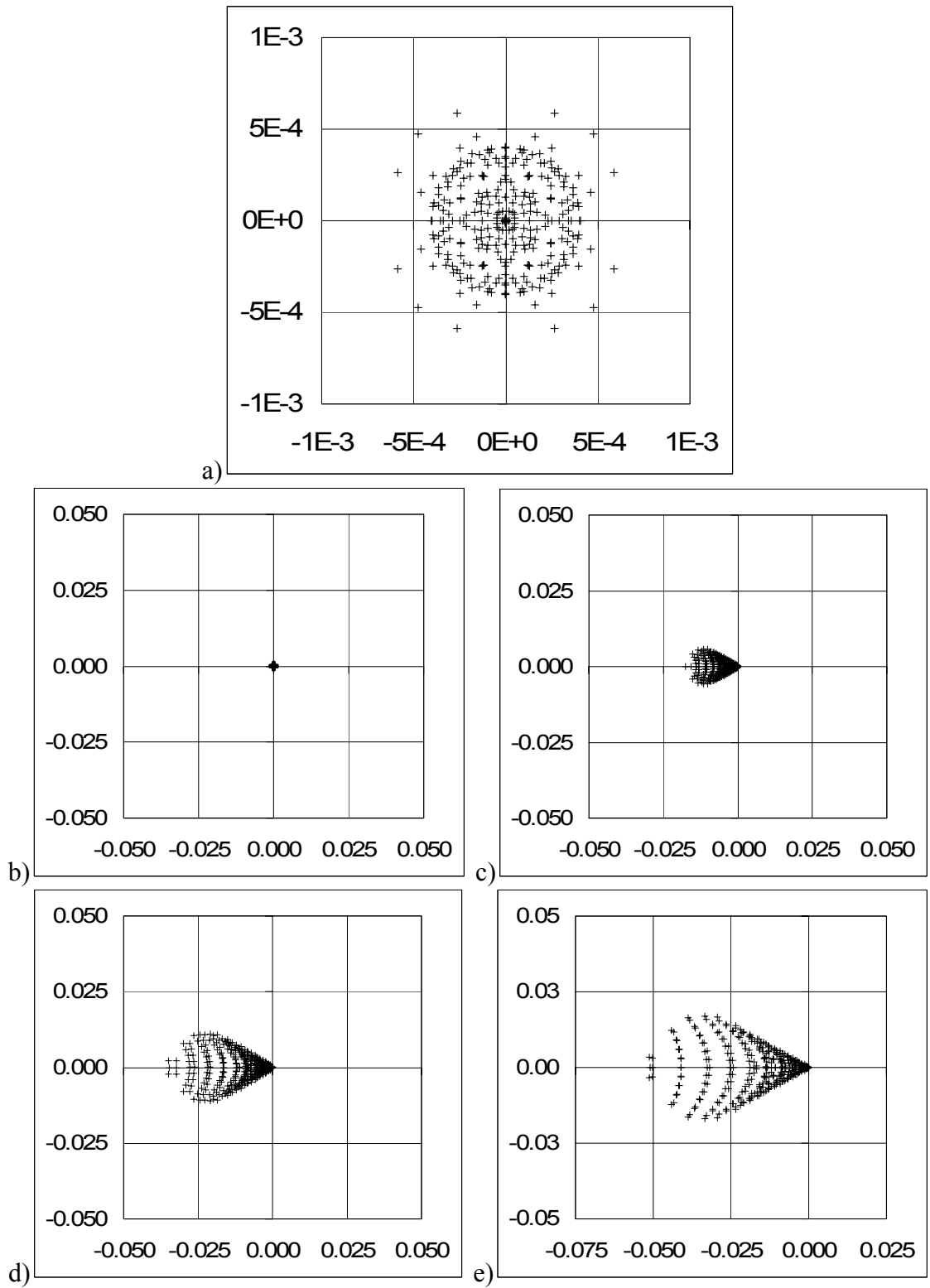
- il potere sagittale, tangenziale e medio o la posizione delle relative immagini, nel caso si parli di un oggetto vicino (diagrammi di campo rappresentati in (figura 41 a);
- l'errore obliquo astigmatico (OAE) ed l'errore obliquo medio (MOE) (figura 41 b);
- l'effetto prismatico, cioè la differenza in radianti dell'angolo di rotazione dell'occhio in presenza o in assenza della lente (figura 41 c);
- la valutazione dell'andamento del raggio quadratico medio indice della qualità dell'immagine creata dalla lente (figura 41 d).

Inoltre è possibile diagrammare la distribuzione della macchia di confusione nella posizione di miglior immagine per un determinato angolo di rotazione dell'occhio (figura 40).

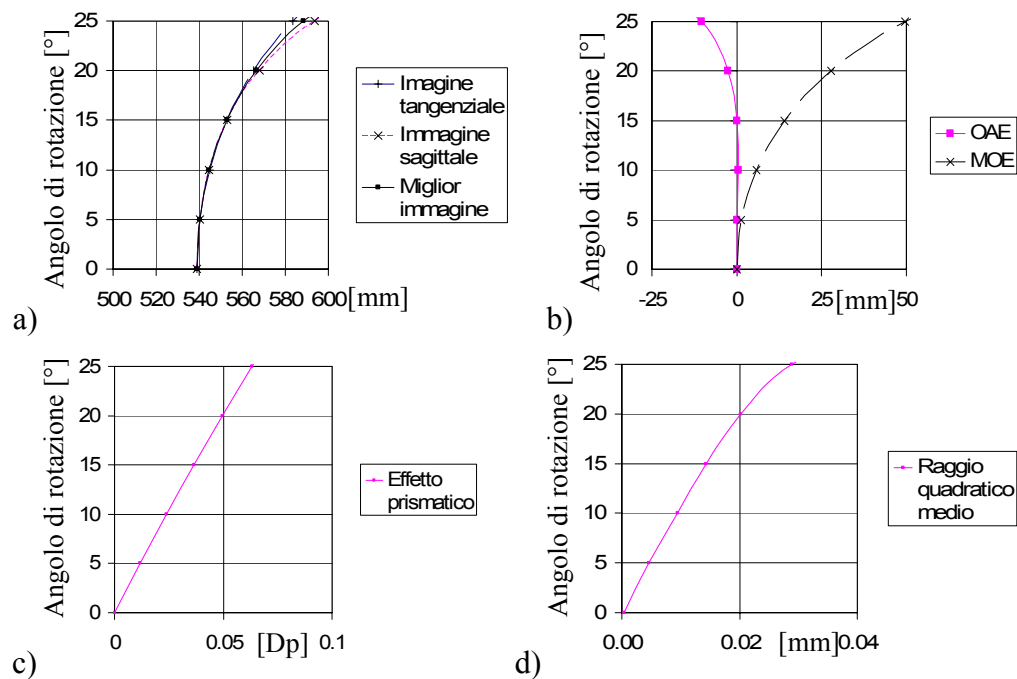


**Figura 39** Coefficiente di asfericità che minimizza l'errore obliquo astigmatico (curva T-S) e il raggio quadratico medio della macchia di confusione (curva Rq) in funzione dell'angolo di rotazione dell'occhio.

La validazione del software è stata effettuata grazie alla collaborazione del Dott. Molesini dell'Istituto Nazionale di Ottica Applicata INOA-CNR di Firenze. Tale risultato è stato ottenuto attraverso il confronto dei risultati ottenuti dall'analisi delle proprietà ottiche di alcuni modelli geometrici mediante un software commerciale (CODE V). I risultati hanno dimostrato un'ottima corrispondenza tra le analisi eseguite con i due diversi software con differenze dell'ordine di qualche millesimo di millimetro per quel che riguarda la posizione della miglior immagine.



**Figura 40** Macchie di confusine ottenute per differenti angoli di rotazione  $\alpha$  dell'occhio:  
a)  $\alpha = 0^\circ$  in scala ingrandita rispetto alle altre immagini, b)  $\alpha = 0^\circ$ , c)  $\alpha = 5^\circ$ , d)  $\alpha = 10^\circ$ , e)  $\alpha = 15^\circ$ .



**Figura 41** Rappresentazione delle proprietà ottiche calcolate con gli algoritmi implementati in funzione dell'angolo di rotazione dell'occhio:

- a) posizione dell'immagine tangenziale, sagittale e media rispetto al centro della lente,
- b) errore obliquo astigmatico (OAE) ed l'errore obliquo medio (MOE),
- c) effetto prismatico, d) raggio quadratico medio.

## **Capitolo IV**

### **Sviluppo di un ambiente CAM per la lavorazione**

In generale le macchine a controllo numerico sono guidate da input, spesso costituiti da file NC, che contengono le coordinate per la movimentazione dei pezzi da lavorare e degli utensili. Data la particolare cinematica delle macchine CNC impiegate nella lavorazione di rettifica e lucidatura di stampi in vetro con geometria a forma libera, e il carattere prototipale delle stesse, è stato necessario sviluppare un ambiente per l'integrazione CAD-CAM che, partendo da modelli geometrici definiti da nuvole di punti o da mesh poliedriche, consenta di ottenere i file necessari per la realizzazione del ciclo di lavorazione e allo stesso tempo consenta una simulazione del percorso utensile.

La necessità di simulare il percorso utensile è legata alla esigenza di evitare spiacevoli inconvenienti, che possono essere legati ad un'errata generazione dei file NC che gestiscono i percorsi utensile, quali spostamenti che portano al danneggiamento delle macchine o all'errata lavorazione del pezzo.

La rettifica del vetro viene tipicamente eseguita con un percorso a spirale, mentre la lucidatrice segue una movimentazione a “zig-zag”, come verrà dettagliatamente descritto nel seguito.

## ***IV.1 Le macchine a controllo numerico***

L'introduzione di macchine a controllo numerico di tipo deterministico per la lavorazione di materiali organici e inorganici nel processo produttivo di lenti oftalmiche ha evidenziando alcune problematiche relative al loro utilizzo [58] e presenta attualmente un notevole interesse scientifico [59]. Parallelamente, il rapido sviluppo della tecnologia a controllo numerico [60] e la sua recente introduzione nel settore dell'ottica [61], ha evidenziato alcune lacune per quel che riguarda la gestione dei cicli di lavorazione delle stesse.

Le macchine a controllo numerico utilizzate nella produzione di stampi e lenti in vetro studiate in questo contesto sono: la rettificatrice ASM 100 CNC e le lucidatrici ASP 200 CNC e SPF 80 CNC, realizzate dalla tedesca Optotech.

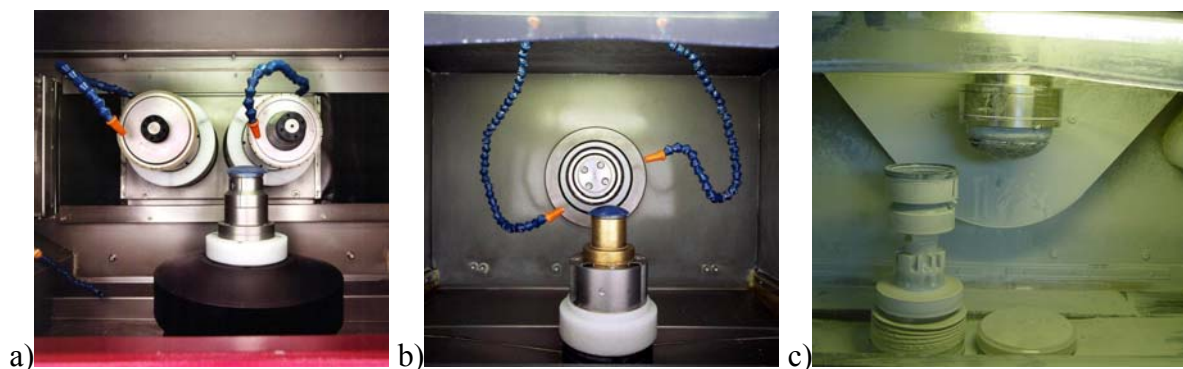
Le movimentazioni delle tre macchine sono guidate da un controllore Siemens SINUMERIK FM-NC/840D che è dotato di una consolle; inoltre per le prime due, quando si desidera generare geometrie di forma complessa, si rende necessario fornire dei file di guida per il percorso utensile, in formato NC. Dalla consolle del controllore delle macchine è possibile scegliere il file contenente il percorso da generare e impostare una serie di parametri necessari al loro corretto funzionamento.

Per approfondimenti sul tipo di macchine a controllo numerico utilizzate in I.O.D.A. si possono trovare informazioni più dettagliate in [62], [63], [64] e [65]. In figura 42 sono visibili le aree di lavoro delle tre macchine a controllo numerico.

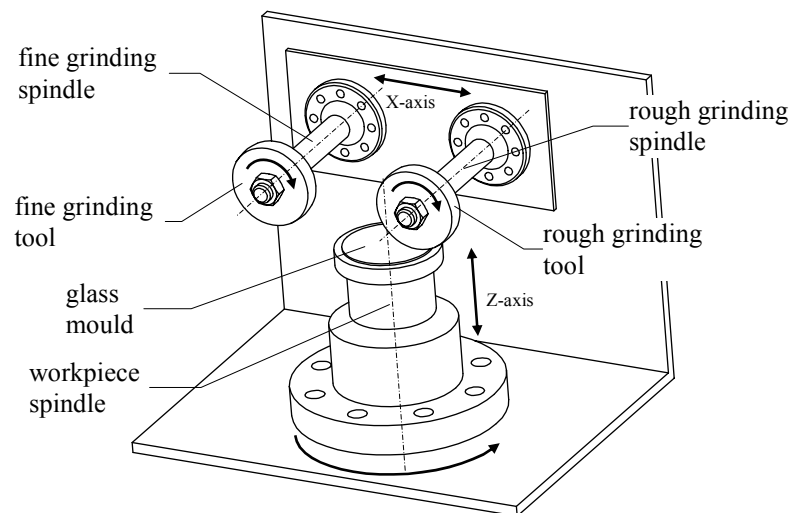
### **IV.1.1 La rettificatrice ASM 100 CNC**

La Optotech ASM 100 CNC Twin Cut è una rettificatrice a controllo numerico con la quale, partendo da uno sbizzato ottenuto per fusione, si riesce a definire la forma dello stampo in vetro prima della successiva lucidatura. Grazie alla sua particolare meccanica di asportazione ed alla sua elevata precisione, con tale macchina è possibile generare un gran numero di superfici a forma libera, ovvero sferiche, asferiche, toriche, progressive, estetiche.

L'operazione di rettifica viene effettuata per mezzo di due mole diamantate con superficie di lavoro di forma sferica: la prima, di sgrossatura, è utilizzata appunto per sgrossare lo sbizzo ed avvicinarsi alla forma desiderata, mentre la seconda, di finitura, di grana più sottile, migliora la finitura superficiale e conferisce la geometria definitiva. Nell'immagine di figura 43 si possono notare, nella parte superiore, i due utensili, quello di sgrossatura a destra e quello di finitura a sinistra, mentre più in basso è ben visibile il mandrino porta pezzo. Questo è in grado di traslare lungo l'asse z e ruotare intorno allo stesso asse. Gli utensili ruotano invece intorno all'asse y e traslano lungo la direzione x.



**Figura 42 Macchine CNC per la produzione di stampi o lenti in vetro:**  
a) rettifica ASM 100 CNC, b) lucidatrice ASP 200 CNC, c) lucidatrice SPF 80 CNC.



**Figura 43 Cinematica della rettifica ASM 100 CNC.**

#### IV.1.2 La lucidatrice ASP 200 CNC

Una volta rettificata la superficie risulta opaca e presenta delle ondulazioni dovute al particolare moto relativo che si instaura tra utensile e pezzo. Quindi, affinché la superficie risulti utilizzabile come stampo per lenti o come lente in vetro, deve essere lucidata. Una possibile soluzione è quella di utilizzare la lucidatrice deterministica Optotech ASP 200 CNC (Aspheric Polishing Machine), che consente di lavorare superfici a forma libera.

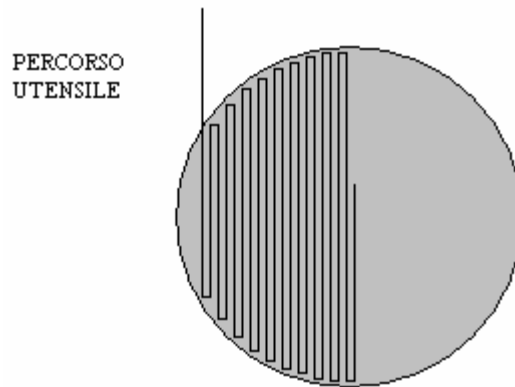
Essa è una lucidatrice a controllo numerico a 4 assi, che presenta una struttura simile a quella della rettificatrice ASM 100 CNC appena presentata. Infatti, come si può notare dall'immagine di figura 42, la zona di lavorazione presenta un mandrino porta pezzo ad asse verticale, con presa sulla lente ad aria compressa, che trasla lungo gli assi  $z$  ed  $y$ , e ruota attorno alla stessa direzione, ed un albero orizzontale sul quale viene montato l'utensile che, oltre ad assicurare la rotazione di quest'ultimo, trasla in direzione orizzontale lungo l'asse  $x$ . Grazie alla particolare cinematica, la Optotech ASP 200 CNC è in grado di far fare all'utensile i medesimi percorsi fatti dalle due mole della rettifica e può lucidare senza alcun problema qualsiasi superficie a forma libera. Con tale macchina, inoltre, il contatto tra la membrana di lucidatura ed il pezzo in lavorazione avviene localmente, e non su tutta la superficie come nelle lucidatrici convenzionalmente utilizzate per il vetro, permettendo così un controllo continuo della forma del pezzo finito anche in questa fase del processo di produzione di stampi per lenti.

All'interno del processo produttivo di tale lucidatrice viene fatta lavorare mantenendo bloccata la rotazione del mandrino, facendo fare all'utensile più passate lungo la direzione  $y$ , ed imponendo al mandrino una traslazione lungo l'asse  $x$  di una determinata quantità dopo ogni passata, con un percorso analogo a quello schematizzato in figura 44. Per generare le varie superfici richieste per ciascun prodotto ottico, è necessario che la variazione della coordinata  $z$  del mandrino porta pezzo permetta all'utensile di seguire la superficie dell'oggetto rettificato.

Tale particolare tipo di percorso è stato scelto per evitare di attuarne uno a spirale, come quello usato in rettifica, in modo da evitare che le impronte degli utensili di lucidatura non si sovrappongano a quelle lasciate dalla rettifica.



L'utensile utilizzato è in gomma e di forma sferica, ricoperto da una membrana in poliuretano, sostituibile una volta usurata; ciò consente, al bisogno, di non doverlo cambiare integralmente. L'azione abrasiva è svolta da una sospensione di ossido di cerio in acqua.



**Figura 44 Schematizzazione del percorso seguito dall'utensile di lucidatura ASP 200 CNC.**

#### **IV.1.3 La lucidatrice SPF 80 CNC**

Per lavorazioni di geometrie più semplici, o comunque per dare una passata veloce al fine di eliminare eventuali impronte lasciate dalla ASP 200 CNC, si ricorre alla macchina a controllo numerico SPF 80 CNC.

Essa è dotata di due alberi in grado di ruotare con velocità angolari differenti attorno ad assi contenuti nel medesimo piano verticale come evidenziato in figura 45. Sull'albero inferiore è montato lo stampo, mentre sull'albero superiore è collegato l'utensile. Quest'ultimo, oltre a ruotare, oscilla nel piano verticale tra un angolo minimo e uno massimo attorno ad un punto che risiede approssimativamente nel centro di curvatura dell'utensile; tale oscillazione causa una leggera flessione dell'albero porta pezzo sottostante, che, accoppiato all'albero con un giunto di gomma flessibile, favorisce una distribuzione più uniforme delle pressioni. L'oscillazione dell'utensile serve a garantire che non ci siano orientazioni privilegiate delle velocità di strisciamento tra utensile e pezzo. La pressione che viene ad esercitarsi tra l'utensile e lo stampo è determinata dalla pressione impostata in macchina attraverso il parametro pressure nominal bottom e va ad influenzare i tempi di lavorazione, come sarà meglio illustrato nel capitolo V.

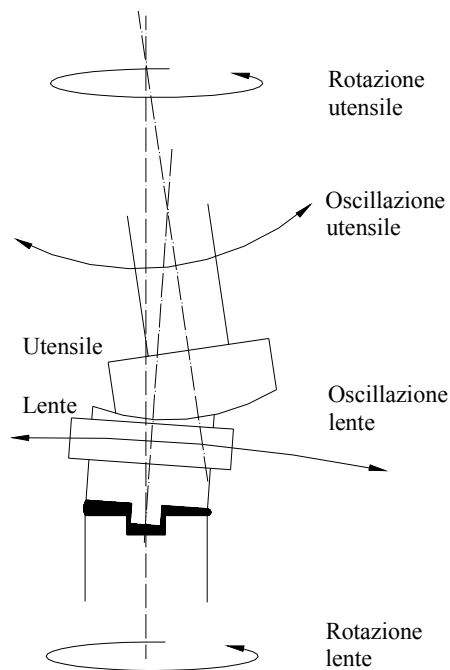


Figura 45 Schematizzazione della cinematica della lucidatrice SPF 80 CNC

## IV.2 Sviluppo dell'ambiente di integrazione CAD-CAM

### IV.2.1 Analisi delle criticità

Le motivazioni che hanno portato allo sviluppo del software V-Lens sono legate alle criticità presenti nel processo di fabbricazione delle lenti oftalmiche [66]. In particolare queste si riferiscono a:

- l'assenza di un software specifico dedicato alla programmazione dei percorsi utensile delle macchine,
- la frammentazione degli applicativi esistenti impiegati per la generazione dei percorsi utensile, per la modifica e l'orientazione delle superfici,
- l'assenza di un'interfaccia utente,
- la mancanza di un visualizzatore e simulatore dei percorsi utensile, che consenta di rilevare la presenza di errori sul percorso utensile, possibile causa di danneggiamenti delle macchine utensili.

## IV.2.2 Il progetto dell'ambiente *V-Lens*

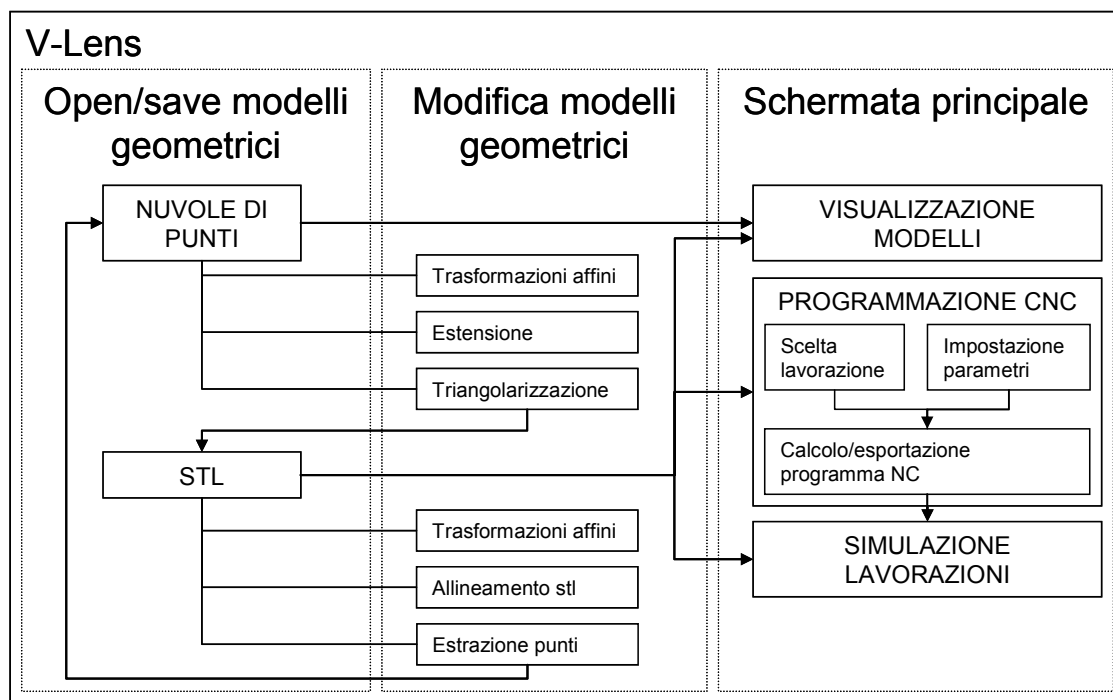
L'analisi delle criticità e l'individuazione delle specifiche della procedura per l'ottenimento dei file macchina ha portato a sviluppare il progetto di un nuovo software che prevede la compilazione di un programma *V-Lens* (Virtual Lens).

L'ambiente progettato deve garantire la presenza di un'interfaccia utente, come illustrato in figura 46, con tre schermate principali legate a tre ambienti distinti in grado di comunicare tra loro:

- l'ambiente di visualizzazione o viewer: è il primo di fronte al quale ci si trova all'apertura del programma. In esso, dopo il caricamento da file stereolitografici o ascii del modello di stampo da lavorare, è possibile visualizzare gli oggetti STL o ASC corrispondenti. Tale ambiente è stato progettato per essere simile ad un qualsiasi viewer inserito all'interno di un software CAD: si possono effettuare roto-traslazioni di tutte le viste (tridimensionali, frontali, superiori e inferiori) e zoom. Gli oggetti caricati possono subire modifiche di traslazione, rotazione, ingrandimento o riduzione, ed inversione della concavità con la convessità. Esistono poi altre funzioni, dedicate a scopi particolari, che saranno spiegate in seguito. Tutte le modifiche possono essere salvate sui file originali o su altri file. Esiste inoltre la possibilità di passare da un oggetto ASC ad un oggetto STL mediante l'algoritmo di triangolarizzazione di Delaunay. Gli oggetti STL così creati o caricati direttamente da file sono pronti per essere elaborati nell'ambiente di calcolo.
- l'ambiente di calcolo del percorso utensile: in esso il file STL caricato, corrispondente alla superficie superiore o inferiore dello stampo o della lente, è in grado di essere elaborato dalla routine di calcolo *CAMLens*, funzione omonima all'applicativo precedentemente citato, tradotta dal Fortran in Visual Basic. L'operatore può inserire in un'interfaccia utente molto intuitiva tutti i parametri necessari alla lavorazione che si vuole effettuare e inoltre può optare per processi di rettifica o lucidatura, con o senza l'opzione di spianatura dello stampo. Un log a video informa sul processo che si sta eseguendo e comunica

qualsiasi eventuale errore si verifichi nel calcolo del percorso utensile. Questo viene creato per poter essere simulato nell'ambiente successivo e salvato in un file di testo per elaborazioni ulteriori in formato ascii. I file macchina sono salvati in formato SPF pronti per essere caricati nelle macchine a controllo numerico di rettifica ASM 100 CNC e lucidatura ASP 200 CNC. Contestualmente vengono prodotti un file di segnalazioni e un file per le eventuali correzioni a seguire. Questo ambiente svolge le operazioni che solitamente sono assegnate ad un software CAM.

- l'ambiente di simulazione: solo a calcolo avvenuto è possibile accedere a questo modulo, in cui, su un viewer molto simile a quello presentato nel primo ambiente, è possibile seguire la simulazione del processo di lavorazione. Per renderla più realistica si sono create delle stereolitografie corrispondenti alle mole di rettifica e lucidatura, e al porta lente. Lo stampo che si vede è lo stesso su cui si è effettuato il calcolo e proviene dall'ambiente di visualizzazione iniziale. I movimenti rispecchiano quanto le ASM 100 CNC e ASP 200 CNC sono in grado di fare.



**Figura 46** Progettazione della struttura dell'interfaccia.

Il progetto è stato sviluppato in ambiente Visual Basic ed è stato strutturato in modo tale da garantire la possibilità di inserire ulteriori moduli sviluppati per la modellazione delle superfici e l'analisi ottico-geometrica dei modelli descritta nel precedente capitolo. Non si ritiene opportuno riportare di seguito le altre specifiche di progettazione per non ricorrere in un'inutile ripetizione di concetti che possono essere rilevati nei paragrafi successivi.

### IV.2.3 Struttura dell'ambiente sviluppato

La struttura dell'ambiente sviluppato (figura 47), nonostante si articoli in un codice non tanto semplice da seguire, può essere spiegata agevolmente. In ingresso, i modelli delle superfici che devono essere lavorate sono importati da file stereolitografici o ascii.

A caricamento avvenuto essi sono visibili sulla finestra iniziale del programma e la loro visualizzazione può avvenire su 4 viste: tridimensionale, frontale, inferiore o superiore. Si possono effettuare zoom e scegliere da mouse rotazioni e traslazioni delle rispettive viste. L'utente può inoltre scegliere se modificare la loro forma o la loro posizione. Alcuni comandi sono disponibili sia per file ascii e che per mesh poliedriche: essi sono Trasla, Ruota, Scala ed Inverti Superficie ed effettuano rispettivamente traslazioni, rotazioni, ingrandimenti e riduzioni, inversioni di curvatura. L'utente ha a disposizione un prompt sul quale inserire i parametri richiesti. Esistono poi altre trasformazioni espressamente dedicate a file asc o stl che saranno descritte dettagliatamente in seguito. Tra queste la più importante riguarda la triangolarizzazione delle nuvole di punti in cui il file ascii viene tassellato tramite triangoli con l'algoritmo di Delaunay [67]. Si tratta di un'operazione in cui un semplice insieme di punti si trasforma nella struttura che compete ad una stereolitografia. Si rende necessario tutto questo, quando si abbia a disposizione un modello ascii dello stampo da cui siano prelevate solo le sue coordinate spaziali e si sia interessati ad effettuare la sua lavorazione, poiché il software accetta solo stereolitografie quali oggetti in input agli ambienti di calcolo e simulazione. Il flow-chart (figura 47) evidenzia chiaramente questa peculiarità del software. Quando si effettua una triangolarizzazione, la nuvola di punti originaria non viene modificata, restando accessibile quale oggetto ASC. Tale operazione, nel produrre una mesh poliedrica

dalla nuvola di punti, origina un nuovo oggetto STL. I controlli booleani sul caricamento di un file STL quindi, si attivano, e con essi i menu di modifica della stereolitografia.

L'avere dunque a disposizione un oggetto stereolitografico è il requisito fondamentale affinché si possa procedere con il calcolo del percorso di rettifica o lucidatura. Se viene superato questo controllo è possibile aprire una seconda finestra dove si possono inserire tutti i parametri necessari a produrre in output i file macchina. Qui l'utente è chiamato a scegliere quale operazione vuole portare a termine e ad inserire correttamente il diametro di lavorazione dello stampo, il diametro dell'utensile, i passi di avanzamento e campionamento ed una serie di altre opzioni che saranno spiegate nel dettaglio nei prossimi paragrafi. Si procede dunque al calcolo del percorso utensile. Se tutto è avvenuto senza incorrere in errori risulta possibile simulare il processo per verificare che tutto rispecchi le attese.

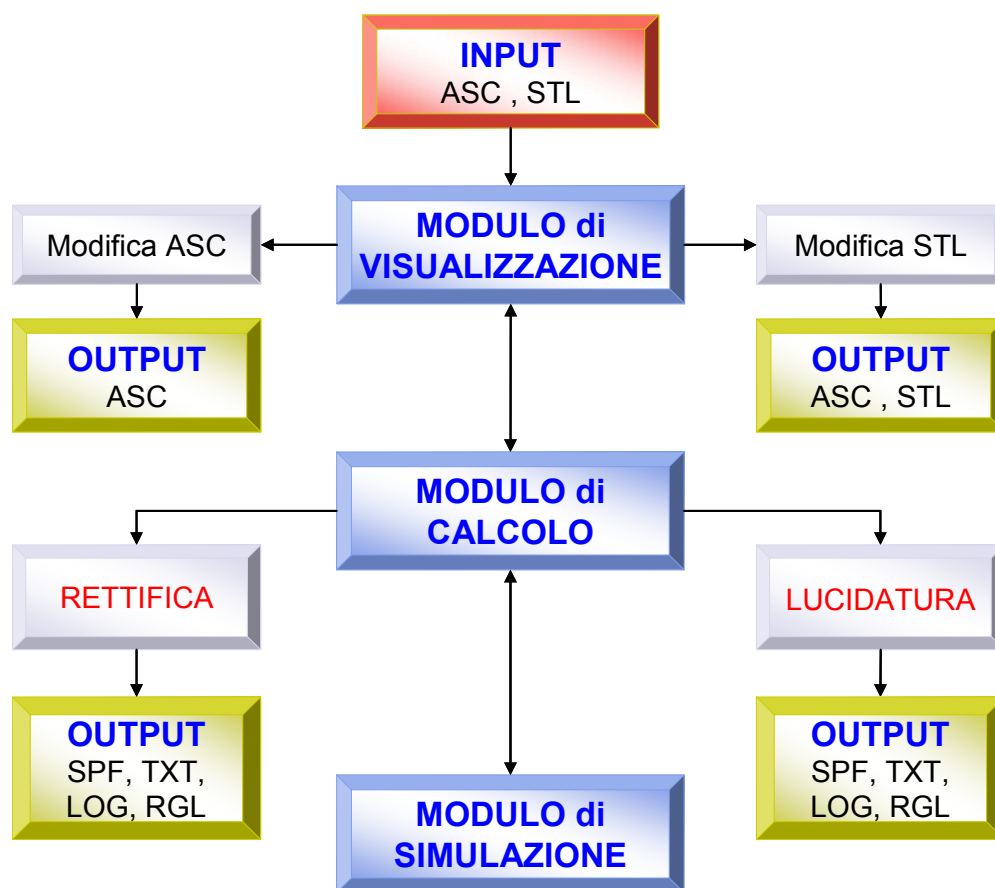


Figura 47 Flow chart della struttura implementata in *V-Lens*.

Nei paragrafi successivi saranno descritti più dettagliatamente gli elementi che costituiscono la struttura del software.

#### *IV.2.3.1 File di input*

Il programma è stato pensato per poter lavorare indipendentemente sulle superfici superiore ed inferiore di uno stampo. Per far ciò è previsto che esistano su file delle loro rappresentazioni, siano esse semplici nuvole di punti (file asc o txt) od oggetti già triangolarizzati (file stl).

Il file ascii è in realtà un semplice file di testo con estensione asc o txt. Contiene al suo interno, inserite riga per riga, le coordinate cartesiane di una serie di punti separate da uno spazio.

Il file stereolitografico (figura 48) invece è una rappresentazione triangolarizzata di una superficie avente una mesh più o meno fitta. Si tratta sempre di un file scritto con caratteri ascii (quindi analizzabile con un semplice NotePad), ma strutturato in modo particolare. Esso apporta informazioni su un oggetto attraverso un insieme di elementi finiti triangolari. La descrizione dell'oggetto è delimitata, per la maggior parte dei software, da due parole chiave in apertura e chiusura del file in questione: "solid OBJECT" ed "endsolid OBJECT" (in realtà il file stl può essere anche binario ma questa rappresentazione non è di nostro interesse). Inseriti in catasta uno di seguito all'altro si trovano i triangoli che approssimano la superficie. Ognuno di questi risulta definito da 3 vertici e dalla normale orientata alla superficie da essi identificata.

Completato il caricamento di una o dell'altra delle rappresentazioni, le informazioni sono trasferite alle variabili corrispondenti per essere passate alle librerie OpenGL. Queste si preoccupano a loro volta di comunicare alla scheda video come rappresentarle.

#### *IV.2.3.2 File di output e percorsi utensile*

Il software, oltre a permettere il salvataggio di stereolitografie e file di punti, genera altri 4 tipi di file in uscita dalle routine di calcolo del percorso di lavorazione. Essi hanno estensione log, txt, rgl e spf.

Il primo è un file di testo in cui si trovano memorizzate le informazioni relative ai parametri che hanno portato alla generazione di un percorso di lavorazione, alle operazioni eseguite ed agli errori incontrati durante le stesse. Si tratta di un ampliamento più dettagliato di quello che si può vedere nel log a video durante l'elaborazione del calcolo.

```
solid OBJECT
facet normal -1.262059e-002 1.937647e-004 9.999203e-001
outer loop
vertex 1.765908e+000 -5.424299e-002 2.229909e-002
vertex 1.766741e+000 0.000000e+000 2.229909e-002
vertex -1.262177e-029 0.000000e+000 0.000000e+000
endloop
endfacet
facet normal -3.625779e-002 5.567310e-004 9.993423e-001
outer loop
vertex 3.307482e+000 -1.015951e-001 7.825630e-002
vertex 3.309042e+000 0.000000e+000 7.825630e-002
vertex 1.766741e+000 0.000000e+000 2.229909e-002
endloop
endfacet
facet normal -3.625779e-002 5.566682e-004 9.993423e-001
outer loop
vertex 3.307482e+000 -1.015951e-001 7.825630e-002
vertex 1.766741e+000 0.000000e+000 2.229909e-002
vertex 1.765908e+000 -5.424299e-002 2.229909e-002
endloop
endfacet
.....
endsolid OBJECT
```

**Figura 48 Esempio di file di stl in formato ascii.**

Il txt è un file ascii in cui compaiono le coordinate dei punti del percorso di lavorazione. Ogni punto è memorizzato per riga e su ognuna si trovano, separate da uno spazio, le coordinate x, y e z. E' stato scelto tale formato per garantire completa compatibilità con i file ascii elaborabili in input dal programma, nonché la possibilità di elaborare i file ottenuti con altri software.

Il terzo è un file per la gestione interna al programma dei percorsi da correggere: sulla prima riga si trova il nome del file da correggere contenente le coordinate dei punti del percorso di lavorazione; sulla seconda è presente un carattere identificativo del tipo di lavorazione che andrà rivista (S nel caso della rettifica, Z in quello della lucidatura); nelle righe a seguire si trova il totale dei punti che descrivono il percorso (in un'unica dichiarazione



se esso è spiraliforme, in più righe rappresentanti il numero di passate se si tratta di una lucidatura).

Il file spf è un file di teso in formato NC in cui sono contenute le istruzioni, opportunamente formattate, relative al ciclo di lavorazione che le macchine di rettifica (figura 49) e di lucidatura (figura 50) devono eseguire. In questi file sono riconoscibili le coordinate che il centro utensile dovrà andare ad occupare ad ogni step (in coordinate cilindriche per la rettifica e in coordinate cartesiane per la lucidatura) e la velocità di rotazione del mandrino. Nel caso della rettifica, dove è necessario un avvicinamento controllato dell'utensile al pezzo, sono identificabili anche il percorso di avvicinamento (lead in) e di allontanamento (lead out) dallo stampo.

; Header	; Lead out
N10 G0 X42.798496	FFWOF
N11 C0.000	N6437 G0
N12 Z46.791366	N6438 C12610.398433 X0.010499 Z41.000347
N13 G1 Z41.791366	N6439 C12620.375520 X0.020154 Z42.000686
ENABLE_SPEED	N6440 C12630.415314 X0.028967 Z43.001018
FFWON	N6441 C12640.441351 X0.036937 Z44.001340
; Lead in	N6442 C12650.456785 X0.044064 Z45.001653
N14 C1.468499 X42.798496 Z41.791366	N6443 C12660.517201 X0.050349 Z46.001957
N15 C2.446603 X42.795475 Z41.791990	N6444 C12670.523930 X0.055788 Z47.002250
N16 C3.424578 X42.792501 Z41.792721	N6445 C12680.614869 X0.060390 Z48.002532
.....	N6446 C12690.615950 X0.064141 Z49.002803
.....	N6447 C12700.760770 X0.067055 Z50.003062
.....	N6448 C12710.731260 X0.069122 Z51.003309
N111 C97.099557 X42.503595 Z41.850411	N6449 C12720.827230 X0.070348 Z52.003543
N112 C98.092532 X42.500314 Z41.850614	N6450 C12730.902299 X0.070732 Z53.003763
N113 C99.085919 X42.497598 Z41.851838	N6451 C12740.962436 X0.070273 Z54.003969
; Spiral	N6452 C12751.128537 X0.068975 Z55.004160
N114 C100.072247 X42.494239 Z41.851758	N6453 C12761.191227 X0.066827 Z56.004337
N115 C101.059738 X42.491437 Z41.852816	N6454 C12771.467595 X0.063850 Z57.004498
N116 C102.050354 X42.488144 Z41.853148	N6455 C12781.558826 X0.060007 Z58.004642
.....	N6456 C12792.066697 X0.055350 Z59.004770
.....	N6457 C12802.170236 X0.049829 Z60.004881
.....	; end program
N6434 C12540.341612 X0.065519 Z40.001976	RET
N6435 C12570.345593 X0.032761 Z40.001020	
N6436 C12539.267156 X0.000000 Z40.000000	

**Figura 49 Esempio di file NC contenente il percorso utensile per la rettifica.**

#### ***IV.2.3.3 Librerie OpenGL e ambienti di visualizzazione e simulazione***

Al fine di rendere possibile la visualizzazione delle informazioni presenti nei file ascii e stereolitografico si rende necessario l'utilizzo di librerie grafiche. Si è optato per le OpenGL rese disponibili da Microsoft per lo sviluppo di codici in Visual Basic. Si tratta di una suite di

funzioni il cui utilizzo professionale presuppone una conoscenza di fondo di problematiche relative alla grafica, all'ottica e alla geometria che non saranno approfondite in questa sede.

```
; Header
G1 Y0 F=5000
H1 = 42000
G1 FFWON F=656.024660
; Percorso
N10 X-40.619742 Y-9.435228 Z36.830203 C0.000 F963.466605
N11 X-40.646159 Y-8.001179 Z36.885076 C0.000 F963.466605
N12 X-40.667799 Y-6.569078 Z36.931228 C0.000 F963.466605
N13 X-40.686520 Y-5.127641 Z36.968412 C0.000 F963.466605
.....
.....
.....
N3196 X40.710204 Y2.085281 Z37.016350 C0.000 F963.466605
N3197 X40.700951 Y3.526555 Z36.998752 C0.000 F963.466605
N3198 X40.688122 Y4.960631 Z36.971838 C0.000 F963.466605
N3199 X40.670152 Y6.400942 Z36.936169 C0.000 F963.466605
N3200 X40.649181 Y7.832420 Z36.891227 C0.000 F963.466605
N3201 X40.623082 Y9.267771 Z36.837253 C0.000 F963.466605
; Lead Out
G1 Z44.136 F=5000
FFWOF
RET
```

**Figura 50 Esempio di file NC contenente il percorso utensile per la lucidatura.**

Il principio base da cui partire per capirne il funzionamento elementare è che per visualizzare un oggetto come insieme di pixel, sia esso descritto da funzioni primitive, insieme di punti o poligoni in un ambiente tridimensionale, bisogna innanzitutto fare in modo che le sue coordinate siano correttamente inserite all'interno di una matrice. Questa risulterà rappresentativa all'interno di una terna di riferimento cartesiana. Un analogo campo vettoriale gestisce i colori. Per rendere poi più realistica la scena si rende necessario l'uso di un sistema di illuminazione, anch'esso descrivibile come insieme di vettori. L'interazione degli ultimi 2 campi vettoriali con la matrice contenente le normali orientate alla superficie degli oggetti permette di ricreare quell'ambientazione che è tipica di una qualsiasi realtà luminosa che ci

circonda. Operazioni di roto-traslazione matriciale permettono infine il movimento di oggetti e di campi vettoriali associati al sistema di illuminazione.

In questo panorama si inseriscono gli ambienti di visualizzazione e simulazione presenti nella prima e nella terza finestra del software. La struttura di entrambe risulta molto simile: l'utente con l'ausilio di mouse e tastiera può effettuare traslazioni, rotazioni, riduzioni e ingrandimenti dell'oggetto selezionato; a seconda delle necessità, può scegliere se rendere visibili le superfici e gli assi cartesiani di riferimento, applicare rendering o limitarsi a visualizzazioni wireframe.

Entrambi gli ambienti permettono all'utente di avere una chiara idea su eventuali problemi che le superfici dello stampo possono manifestare o il percorso di lavorazione calcolato può aver generato. E' quindi in grado di interagire modificando i parametri che ha inserito e simulando nuovamente il processo, senza dover suo malgrado sperimentarlo a fine ciclo di produzione.

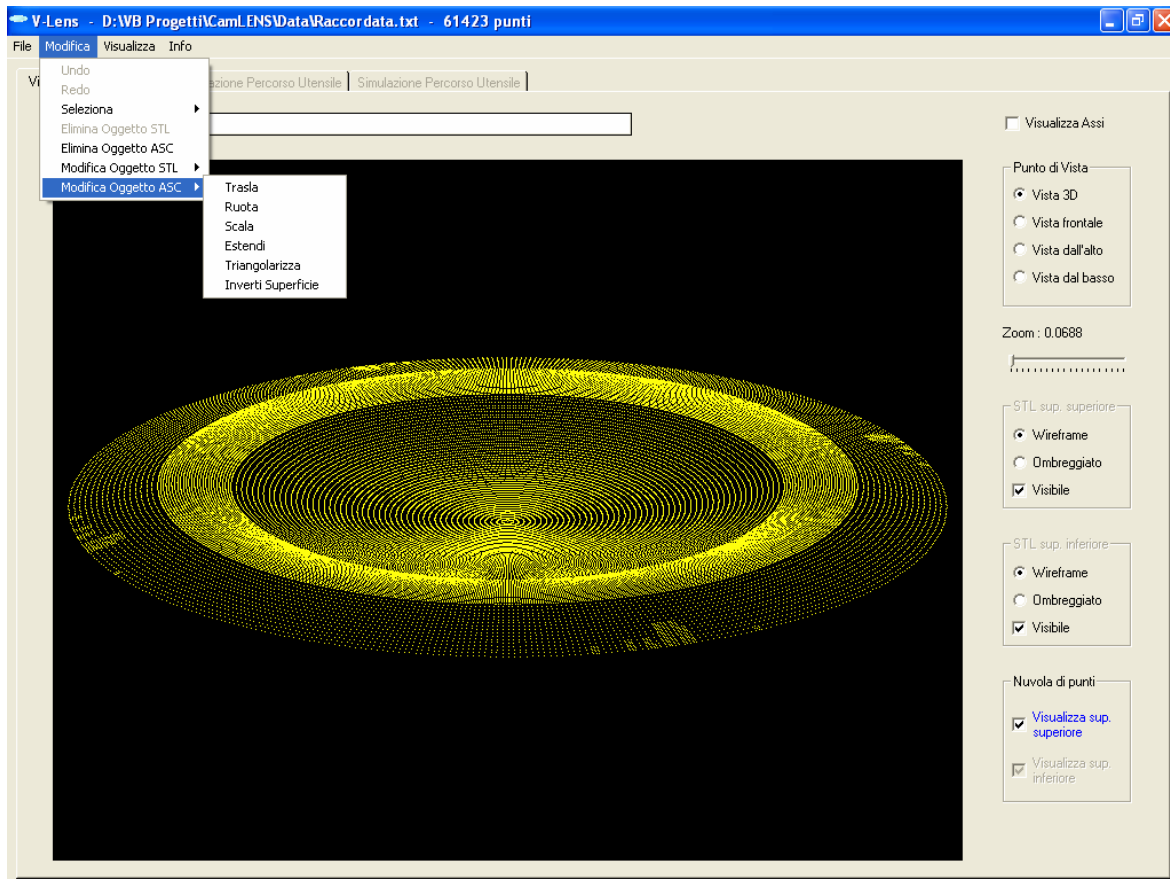
#### *IV.2.3.4 Ambiente di visualizzazione*

All'apertura del programma ci si trova davanti ad una schermata analoga a quella riportata in figura 52. L'utente, a questo punto, ha la facoltà di importare modelli geometrici di lenti in formato ascii o stl.

La visualizzazione del modello importato risulta possibile grazie alla cosiddetta PictureBox, un oggetto di Visual Basic sul quale si può disegnare ed aggiornare velocemente tramite le librerie OpenGL tutto ciò che vi è contenuto. L'utente ha la facoltà di visualizzare o meno i modelli geometrici importati e gli assi di riferimento del sistema cartesiano. Anche tutte le eventuali modifiche apportate su tali oggetti sono immediatamente aggiornate su schermo, in modo tale che l'operatore abbia un'idea precisa di quello che sta facendo.

La vista nella direzione orizzontale e verticale del modello geometrico viene aggiornata, a seconda dei movimenti che vengono eseguiti dal mouse con il tasto sinistro premuto. Nella vista tridimensionale ci si muove lungo le 3 direzioni principali; nelle altre 3 viste bidimensionali, invece, l'orientazione possibile coincide con quella permessa dal piano di proiezione. Se si tiene premuto il tasto destro del mouse si applica invece uno zoom, cosiddetto manuale. Corrispondentemente viene variato uno slider (zoom automatico) e

l'etichetta ad esso associata, per informare sul livello di ingrandimento o riduzione ottenuto. Le combinazioni di shift da tastiera e tasto destro o sinistro del mouse ruotano a loro volta la vista corrente, rispettivamente intorno all'asse z o agli assi x e y. Si ricorda che queste combinazioni hanno come unico fine l'aggiornamento della vista corrente, non della posizione degli oggetti in essa contenuti.



**Figura 51** Schermata di visualizzazione e modifica del modello geometrico con una nuvola di 61.423 punti.

Nel caso in cui sia richiesto un input da parte dell'utente (e ciò avviene ogniqualvolta si voglia roto-traslare un oggetto, scalarlo, o estendere un nuvola di punti), si attiva il prompt per l'inserimento dei parametri. Si tratta di una semplice TextBox di Visual Basic in cui il campo stringa inserito viene formattato da una funzione che si occupa di controllare che i campi al suo interno siano scritti correttamente. L'operatore, infatti, è tenuto ad inserire in essa una terna di valori numerici separati da uno spazio e a premere il tasto Invio per validarne il contenuto. Eventuali errori sono comunicati con una MessageBox.

I restanti frame presenti sulla destra della finestra principale del programma permettono di scegliere quale oggetto rendere visibile sul viewer.

Il menu del programma si completa con le tendine:

- “File” avente altre 2 voci per il salvataggio dei file ASC e STL ed una per l’uscita dal programma (“Esci”);
- “Modifica” avente anche i comandi di Undo e Redo per la navigazione tra i backup;
- “Visualizza” dove si seleziona quale finestra portare in primo piano;
- “About” in cui si trovano informazioni sul programma e il manuale d’uso.

Se si opta per un modello di punti, dopo la lettura da file, la nuvola risulta visibile sulla PictureBox. Il menu a tendina “Modifica”, alla voce “Modifica Oggetto ASC”, permette di scegliere l’operazione da effettuare. Le prime 3 traslano, ruotano o ingrandiscono e riducono della quantità corrispondente a quella digitata sul prompt dall’utente.

In “Trasla”, le traslazioni lungo i 3 assi cartesiani devono essere espresse in millimetri e spaziate sul prompt con il carattere space; non vengono passate al programma finché non viene digitato “Invio”.

Analogamente, dopo aver cliccato su “Ruota” vengono caricati i 3 angoli in gradi relativi all’inclinazione dell’oggetto sui 3 assi cartesiani di riferimento. La notazione utilizzata è quella prevista da Cardano che compone la trasformazione come prodotto delle 3 matrici di rotazione relative agli angoli alfa, beta, gamma (rispettivamente tra gli assi x, y e z dei riferimenti locale e globale). Nel caso in cui si voglia procedere con delle rotazioni in ordine differente bisogna preoccuparsi di farlo in 3 passi successivi (ad esempio: ruotare intorno all’asse y di 3 gradi e successivamente di 2 intorno a x è diverso dal compiere la composizione delle 3 rotazioni rispetto a x, y e z di 2, 3 e 0 gradi).

Il comando “Scala” richiede invece i 3 coefficienti di amplificazione lungo gli assi cartesiani. La formattazione dei dati al prompt è identica a quella precedentemente descritta.

“Inverti Superficie” effettua solamente un’inversione di segno della coordinata z. Può essere particolarmente utile, quando si ha a disposizione un modello di superficie riferito ad

una lente ed è necessario convertirlo in uno stampo da lavorare: mediante tale comando si può trasformare la concavità in convessità e viceversa.

Maggiore attenzione va prestata al comando “Estendi”. Si tratta di una modifica della dimensione radiale del modello geometrico, il quale viene esteso con tratti parabolici a partire da un certo diametro e fino ad una misura desiderata, inseriti dall’utente. E’ necessario inserire al prompt anche il cosiddetto diametro di sostegno e una misura, sempre in millimetri di quello che si vorrà utilizzare come passo di campionamento.

Un discorso a se stante merita invece il comando “Triangolarizza”. Per poter procedere con le fasi di calcolo e simulazione del percorso utensile è necessario creare, nel caso in cui la superficie sia rappresentata da una nuvola di punti, un oggetto stereolitografico. A questo si dedica la serie di routine che sono chiamate, quando si esegue il comando in oggetto. Le coordinate dei singoli punti della nuvola vengono processate mediante un’implementazione dell’algoritmo 2D di Delaunay. Questo, partendo da un insieme di almeno 3 punti distinti nello spazio, permette di definire una serie di triangoli interconnessi, caratterizzati dalle coordinate dei 3 vertici e della normale al piano che li contiene. Essi definiscono un modello geometrico discretizzato della superficie dello stampo i cui vertici coincidono con la nuvola di punti. Ogni punto inizialmente appartenente all’oggetto ascii è ora il vertice di uno dei triangoli che approssimano il modello di superficie. L’algoritmo permette anche un’indicizzazione dei triangoli fondamentale per far sì che le normali ad ognuno di essi risultino essere orientate. In questo modo si ha la possibilità di ricreare, tramite le librerie OpenGL, un disegno tridimensionale del modello, in cui superfici inferiori e superiori, curvature ed eventuali spigoli acquisiscono grazie al sistema di illuminazione un certo realismo, attraverso i classici algoritmi di Gouraud e di Phong [54].

Come già accennato, l’utente può scegliere in input un file stereolitografico. A fine caricamento esso appare sulla PictureBox in modalità wireframe grazie alla quale risulta evidente la mesh triangolare. Maggiore realismo viene conferito al modello, quando si scelga di passare alla modalità renderizzata. Come nel caso delle nuvole di punti anche qui si possono fare le solite operazioni di roto-traslazione della vista o scegliere tra le altre 3 viste disponibili.

Il menu a tendina “Modifica”, alla voce “Modifica Oggetto STL”, permette di scegliere anche per le stereolitografie l’operazione da effettuare. Senza dilungarsi sui primi 3 comandi, che traslano, ruotano, ingrandiscono e riducono, come già con gli oggetti ascii, o sull’ultimo relativo all’inversione della curvatura, si desidera porre l’attenzione su “Sposta punto più basso in O” e “Allinea normale in O con asse z”. Si tratta di 2 subroutines espressamente dedicate ad evitare la nascita di errori nel ciclo di rettifica degli stampi. Quando la mola rettificatrice, durante il percorso a spirale, si trova a lavorare la zona centrale dello stampo, si possono produrre inversioni nel moto di rotazione del mandrino porta lente. Per evitare questo tipo di problema risulta necessario orientare la stereolitografia in modo che la normale determinata per le coordinate 0, 0, z risulti coincidente con l’asse z.

“Sposta punto più basso in O” è un comando che trasla il punto più basso della superficie in esame sull’origine del sistema di riferimento. Risulta utile quando si lavora su superfici in cui il centro dello stampo debba essere anche il punto avente coordinata z minima. Si riescono a gestire anche disassamenti micrometrici.

“Allinea normale in O con asse z” determina l’intersezione tra la stereolitografia e l’asse z e calcola la normale nel punto di intersezione stesso; essa viene determinata come nella routine “CAMLens” successivamente descritta (la normale nel punto di intersezione si ottiene come interpolazione lineare delle normali determinate ai vertici dei triangoli di intersezione; le normali ai vertici sono calcolate come media delle normali alle faccette che concorrono in quel vertice; lo stesso procedimento viene usato sia nel ray tracing sia nelle operazioni di shading baste sugli algoritmi di Gouraud e di Phong [54]). Successivamente verifica che l’angolo di inclinazione della perpendicolare così ottenuta sia parallelo all’asse z. In caso affermativo non vengono apportate modifiche, diversamente ruota la stereolitografia fino ad ottenere il parallelismo desiderato.

Al fine di evitare che calcoli laboriosi dal punto di vista del tempo impiegato finiscano per rendersi sterili in caso di operazioni errate, si è deciso di inserire la possibilità di memorizzare le nuvole di punti ottenute dalle ultime 20 operazioni. E’ stato creato, cioè, un sistema di “Undo”, “Redo” nel quale le coordinate dell’ultima nuvola di punti modificate vengono salvate in memoria, pronte per poter essere richiamate all’occorrenza. Tale

meccanismo consente di navigare tra le modifiche effettuate ai file ascii secondo una cronologia discendente (Undo) o ascendente (Redo).

#### *IV.2.3.5 Ambiente per il calcolo del percorso utensile*

Questo ambiente si integra con entrambi quelli relativi alla visualizzazione e alla simulazione. Diventa accessibile solo nel caso in cui è presente in memoria un modello geometrico della superficie superiore o inferiore in formato stereolitografico, importato da un file nativo o generato ex novo da una nuvola di punti. Nella finestra ad esso relativa è selezionabile il processo di lavorazione (rettifica o lucidatura) che andrà calcolato e potrà essere simulato; sono impostabili i parametri inerenti ad esso e si può monitorare a fine calcolo se esistono degli errori. L'operatore può decidere tra rettifica e lucidatura, optando eventualmente per un'operazione di spianatura. Dopo il salvataggio dei file di output si può intraprendere la simulazione. Si è cercato di rendere nel modo più intuitivo possibile quella che deve essere l'interfaccia di inserimento dei parametri di lavorazione per l'operatore (figura 52).

Come si può notare, c'è un'opzione di selezione della superficie da lavorare, nel caso in cui l'utente abbia caricato entrambi gli STL superiore ed inferiore. E' data la possibilità di scegliere se generare ex novo un percorso o se correggerne uno già esistente, di effettuare un ciclo di rettifica o lucidatura inserendo tutti i parametri di lavorazione necessari, di aggiungere l'opzione di spianatura. Si è lasciata libertà nella scelta dei nomi da associare ai file di output.

L'operatore è tenuto ad inserire:

- parametri generali necessari al ciclo di lavorazione:
  - diametro di lavorazione [mm]: è il diametro dello sbizzo da lavorare dal quale si otterrà lo stampo,
  - passo avanzamento [mm]: nel caso della rettifica rappresenta il passo della spirale piana che viene proiettata per generare il percorso utensile; nel caso della lucidatrice rappresenta la distanza tra due linee successive del percorso a zig-zag,



- passo campionamento [mm]: è la distanza in millimetri che intercorre tra un punto del percorso ed il successivo durante l'avanzamento dell'utensile (campionamento della spirale e del percorso a zig-zag),
- raggio utensile [mm]: è il raggio dell'utensile di rettifica o lucidatura,
- tolleranza vertice [mm]: è la tolleranza che viene adottata nella ricerca del vertice,
- intorno punti non trovati [mm]: è l'incremento in direzione x e y che viene fornito ad un punto del percorso da proiettare nel caso in cui una sua prima proiezione non abbia intersecato nessun triangolo;
- parametri necessari al calcolo del percorso di avvicinamento (lead in):
  - incremento raggio [mm]: rappresenta la distanza di avvicinamento in direzione ortogonale alla superficie da distribuirsi sul numero di giri di avvicinamento e su ogni punto giro. Utilizza lo stesso approccio della routine "CAMLens" ipotizzando di utilizzare un utensile di diametro maggiore,
  - incremento altezza [mm]: è un tipo di avvicinamento simile al precedente, ma l'approccio avviene in direzione verticale e non ortogonalmente alla superficie,
  - punti per giro: è il numero delle posizioni circonferenziali dei punti di avvicinamento in ogni giro,
  - numero giri: è il totale dei giri utilizzati per l'avvicinamento;
- parametri necessari al calcolo del percorso di allontanamento (lead out)
  - incremento raggio [mm]: è, per ogni punto di allontanamento, l'incremento che viene dato al raggio della mola per generare il percorso di allontanamento,
  - incremento angolare [deg]: è l'incremento angolare dei punti da proiettare, per ogni punto di allontanamento,
  - numero punti: è il totale dei punti di allontanamento;
- parametri necessari alla correzione delle oscillazioni nel percorso a spirale:
  - numero correzioni: è il numero di volte che viene eseguita l'operazione di smoothing (media mobile sulla coordinata z del percorso utensile in coordinate cilindriche nel caso della rettifica, media mobile in coordinate cartesiane su y, z nel caso della lucidatura) sul percorso generato,

- punti da correggere: rappresenta il numero di punti da considerare, prima e dopo ogni punto del percorso da correggere, nell'eseguire lo smoothing,
- punti iniziali da non correggere: è il totale dei punti iniziali del percorso utensile che non dovranno essere corretti,
- punti finali da non correggere: è il totale dei punti finali del percorso utensile che non dovranno essere corretti;
- parametri per l'eliminazione delle inversioni:
  - punti iniziali da non correggere: è il totale dei punti iniziali del percorso utensile che non dovranno essere corretti,
  - punti finali da non correggere: è il totale dei punti finali del percorso utensile che non dovranno essere corretti.

V-Lens - D:\WB Progetti\CamLENS\Data\Raccordata.stl - 122299 triangoli

File Modifica Visualizza Info

Visualizzazione Superfici | **Generazione Percorso Utensile** | Simulazione Percorso Utensile

Selezione Tipo Superficie: ☐ Inferiore ☒ Superiore

Selezione Tipo Percorso: ☒ Generazione ☐ Correzione

Selezione Lavorazione: ☒ Rettifica ☐ Lucidatura

Opzioni Spianatura: ☐ Effettua Spianatura ☒ Diametro  ☐ Freccia

Parametri Lavorazione: Tempo di Lucidatura [s]

Parametri:

Diametro di lavorazione [mm]   
 Passo avanzamento [mm]   
 Passo campionamento [mm]   
 Raggio mola [mm]   
 Tolleranza vertice [mm]   
 Intorno punti non trovati [mm]

Opzioni:

☒ Correzione oscillazioni spirale

Numero correzioni   
 Punti da correggere   
 Punti iniziali da non correggere   
 Punti finali da non correggere

☒ Eliminazione inversioni

Punti iniziali da non correggere   
 Punti finali da non correggere

LEAD IN - Rettifica

Incremento raggio [mm]   
 Incremento altezza [mm]   
 Punti per giro   
 Numero giri

LEAD OUT - Rettifica

Incremento raggio [mm]   
 Incremento angolare [deg]   
 Numero punti

Genera File SPF   
 Genera File TXT  ☒  
 Genera File LOG  ☒  
 Genera File RGL  ☒  
 Correggi File RGL

Caricamento file STL :  
 D:\WB Progetti\CamLENS\Data\Raccordata.stl  
 Attendere ...  
 Il file è stato caricato correttamente.

NUMERO FACCE TTE : 122299  
 LATO MASSIMO [mm] : 0.650

**Figura 52** Schermata per l'elaborazione del percorso utensile.

Nel processo di lucidatura è anche richiesta la durata temporale della lavorazione; va inserita in secondi e viene utilizzata per calcolare la velocità di traslazione del mandrino porta utensile in millimetri al minuto.

Se è richiesta la spianatura, esiste la possibilità di impostare o un diametro a partire dal quale iniziare la lavorazione, o una freccia; c'è anche l'obbligo di selezionare se si tratti di un processo produttivo per lenti assialsimmetriche o meno.

Come accennato il percorso utensile da fornire in macchina corrisponde alla posizione dei centri dello stesso rispetto a un sistema di riferimento; tali posizioni sono calcolate costruendo una spirale piana, campionandola e proiettando i punti ottenuti sul modello geometrico definito da una mesh poliedrica; a questo punto, per passare dalle posizioni di contatto tra pezzo e utensile, alla posizione del centro utensile, bisogna calcolare la normale nei punti di intersezione e muoversi lungo la stessa di una quantità pari al raggio dell'utensile. Anche in questo caso la normale nel punto di intersezione viene calcolata attraverso gli algoritmi di shading proposti da Gouraud e di Phong [54]. Nel caso della lucidatura il principio utilizzato è lo stesso, ma il percorso che viene proiettato sul modello geometrico è definito da un percorso a zig-zag.

#### *IV.2.3.6 Ambiente di simulazione*

Dopo aver concluso con successo la generazione dei file NC per il controllo dei cicli di lavorazione e dei file ascii con le coordinate dei punti del percorso, è possibile passare alla simulazione dei processi, passando le coordinate dei punti del percorso utensile alle librerie grafiche. La stereolitografia che viene utilizzata per la visualizzazione dello stampo è la stessa sulla quale sono stati effettuati i calcoli, mentre quelle relative al porta lente e ai 2 utensili di rettifica e lucidatura sono caricate automaticamente da file STL che il software deve trovare nella directory di default. In caso di errore, nato in conseguenza di un'accidentale cancellazione di tali stereolitografie o di directory inesistente, la simulazione non può procedere. I modelli stereolitografici creati, "PortaLente.stl", "Mola40mm.stl", "Lucidatrice.stl", presenti nella directory "Data", sono stati generati con Rhinoceros utilizzando una mesh di compromesso tra la minima necessaria a conferire realismo all'oggetto e la massima accettabile dalle schede grafiche di media concezione. Avendo a

disposizione schede video per workstations con istruzioni OpenGL implementate in hardware, o comunque aventi prestazioni superiori alla media, si può optare per il caricamento della serie di stereolitografie high-definition “HD-PortaLente.stl”, “HD-Mola 40mm.stl”, “HD-Lucidatrice.stl” già presenti nella directory “Data”, oppure per la generazione di file stl ancor più dettagliati, senza inficiare la velocità di simulazione. Va ricordato che nel caso in cui si scelga di ricreare i modelli di rettificatrice e lucidatrice, i diametri devono rispettare le seguenti dimensioni: 40 mm e 34.92 mm; diversamente si incorre in errori di scala. Infatti, in V-Lens esiste una funzione preposta all’ingrandimento ed alla riduzione dei modelli d’utensile che controlla il valore del diametro inserito nell’ambiente di calcolo e procede con la scalatura degli stl già caricati nel caso in cui il fattore di scala sia diverso da 1. Poiché questo è calcolato come rapporto tra la dimensione della mola scelta dall’operatore e quella di default memorizzata nel codice, cambiando quest’ultima si falserebbe la scala.

La schermata che in questo caso si presenta all’utente è rappresentata in figura 53. La simulazione comincia quando l’utente preme il pulsante omonimo e può essere messa in pausa o terminata prima della fine. Una barra di avanzamento consente di scegliere il punto da cui partire o continuare; un’etichetta a lato indica il punto del percorso correntemente disegnato.

Come nella schermata di visualizzazione del modello geometrico si può scegliere per ogni oggetto tridimensionale se visualizzarlo in modalità wireframe o renderizzata, se mostrare gli assi cartesiani, la griglia o il percorso utensile. Anche in questo ambiente l’operatore può controllare nel dettaglio la simulazione ruotandola, zoomandola o cambiandone la vista da 3D a frontale, superiore o inferiore.

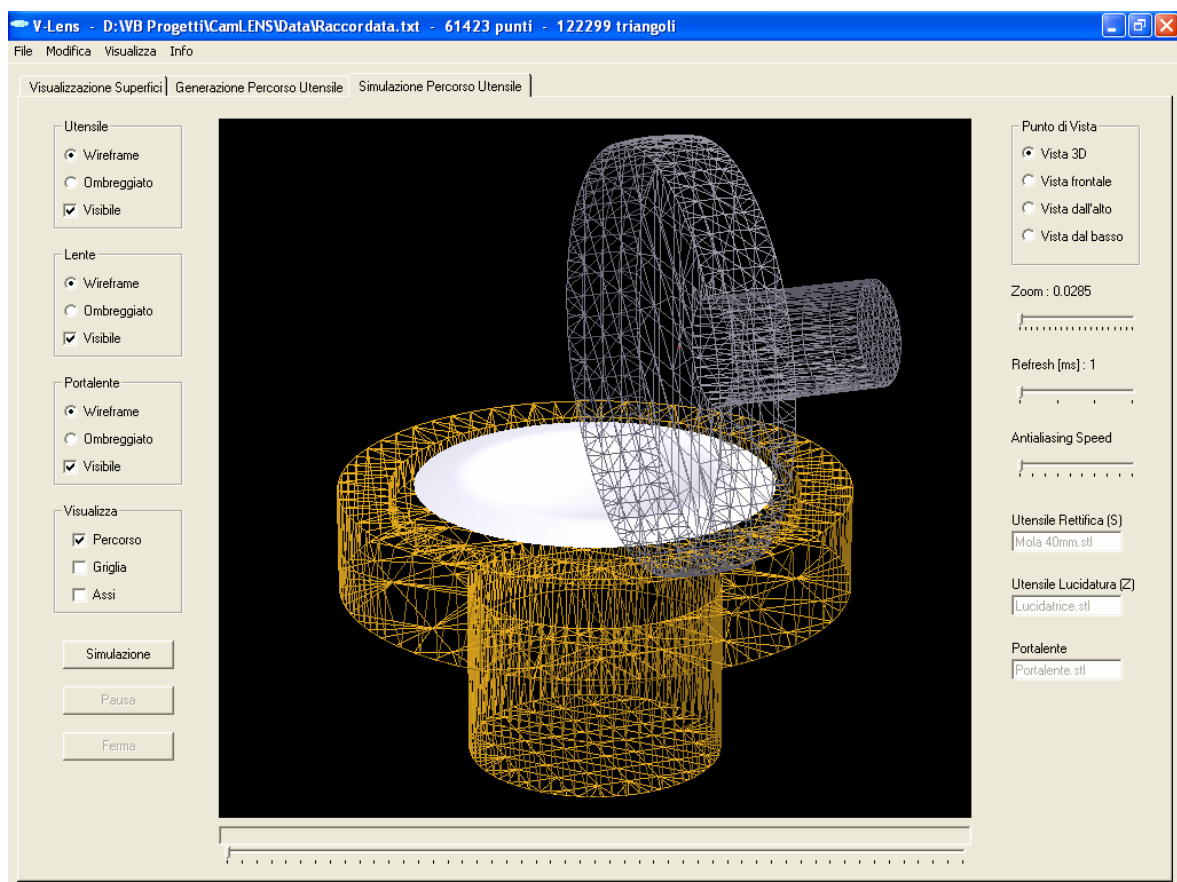
La PictureBox, a seconda dei movimenti che su di essa vengono eseguiti dal mouse con il tasto sinistro premuto, aggiorna la vista nella direzione orizzontale e verticale corrispondente. Nella vista tridimensionale ci si muove lungo le 3 direzioni principali; nelle 3 viste bidimensionali, invece, l’orientazione possibile coincide con quella permessa dal piano di proiezione.

Se si tiene premuto il tasto destro del mouse si applica uno zoom, cosiddetto manuale. Corrispondentemente viene variato uno slider (zoom automatico) e l’etichetta ad esso associata, per informare sul livello di ingrandimento o riduzione ottenuto.

Le combinazioni di shift da tastiera e tasto destro o sinistro del mouse ruotano infine la vista corrente, rispettivamente intorno all'asse z o agli assi x e y.

Oltre al controllo dei movimenti e dello zoom, c'è la possibilità di ridurre la velocità di simulazione aumentando il ritardo nell'aggiornamento del disegno con un delay che può variare tra 1ms, 10ms, 100ms ed 1s. In questo modo l'utente può controllare nel percorso alcuni dettagli sfuggiti durante una simulazione eseguita a velocità normale.

Funzione analoga è svolta dal pulsante che permette di mettere in pausa la simulazione o di ripeterla.



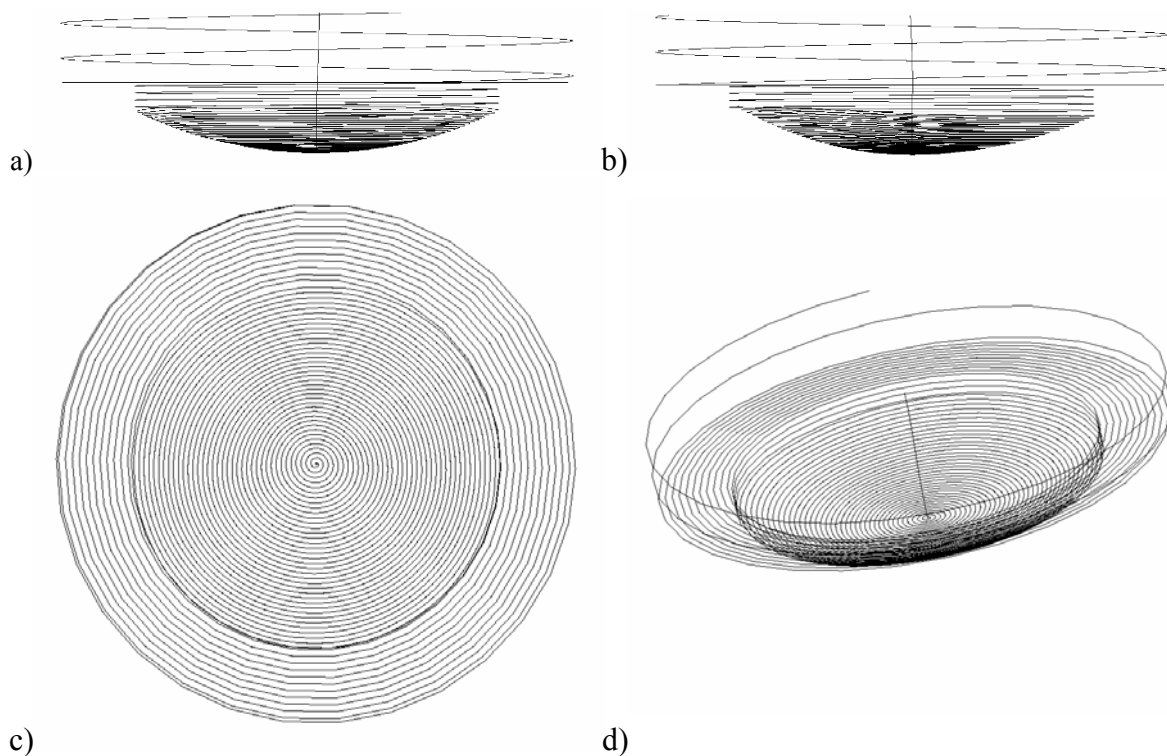
**Figura 53 Schermata per la simulazione del percorso utensile.**

Ancora, "Antialiasing Speed" è una feature che consente di evitare il noto problema dell'aliasing in cui si ha l'impressione che un fenomeno che avviene in alta frequenza sembri invece avvenire a frequenza molto più bassa, fino al punto che l'occhio umano potrebbe percepire come antioraria una rotazione che in realtà sta avvenendo in verso orario. Nel caso

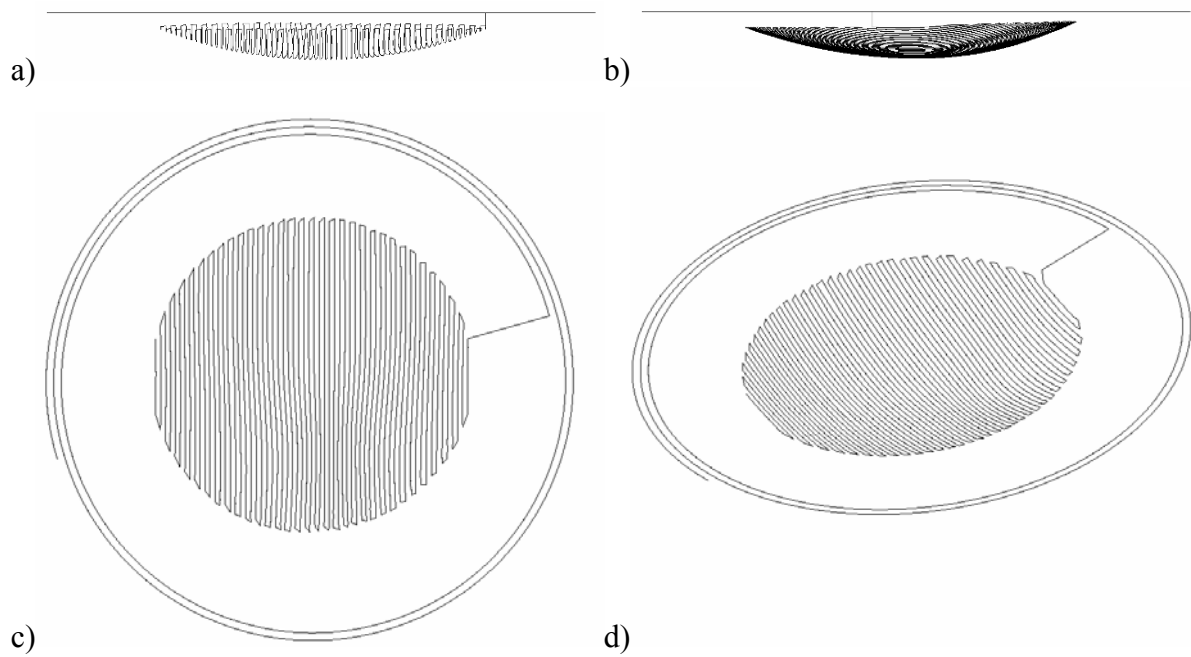
in cui si avesse l'impressione che ciò accada è sufficiente muovere lo slider di una o due tacche per risolvere il problema.

Gli ambienti di visualizzazione e di simulazione, consentono all'utente di avere una chiara idea su eventuali problemi che, le superfici dello stampo o il percorso di lavorazione calcolato, possono manifestare. E' quindi in grado di interagire modificando i parametri che ha inserito e simulando nuovamente il processo, senza dover suo malgrado sperimentarlo a fine ciclo di produzione.

Di seguito riportiamo la rappresentazione del percorso utensile ottenuto in rettifica figura 54 e lucidatura figura 55 con l'opzione di spianatura del bordo della lente. Per la visualizzazione delle movimentazioni degli utensili, del mandrino porta pezzo e della lente, si rimanda a [66].



**Figura 54 Rappresentazione su 4 viste (a) vista frontale, b) vista laterale, c) vista dall'alto, d) vista 3D) del percorso utensile calcolato per la rettifica con lead in e spianatura al bordo.**



**Figura 55 Rappresentazione su 4 viste (a) vista frontale, b) vista laterale, c) vista dall'alto, d) vista 3D) del percorso utensile calcolato per la lucidatura con spianatura al bordo.**





## **Capitolo V**

### **Caratterizzazione del processo produttivo**

L'ottimizzazione di una lavorazione ad asportazione di materiale quale la rettifica e la lucidatura risulta un compito arduo in quanto coinvolge un vasto insieme di parametri, quali i materiali da lavorare, i materiali degli utensili, le dimensioni dei grani che garantiscono l'azione abrasiva, i fluidi che interagiscono chimicamente durante l'asportazione di materiale, la rigidità delle macchine utensili e i parametri di lavorazione.

Per poter giungere ad un risultato di questo tipo è necessario svolgere un'attività di caratterizzazione delle lavorazioni prese in considerazione e introdurre, dove possibile, modelli che prevedano i risultati ottenuti in funzione dei parametri prima citati.

La caratterizzazione effettuata è stata rivolta in particolare allo studio dello stato superficiale ottenuto nelle lavorazioni di rettifica e lucidatura di campioni in vetro con diverse geometrie, valutando gli errori micro e macrogeometrici, in funzione dei parametri relativi al ciclo di lavorazione.

## ***V.1 Tipologie di processi per la produzione di lenti***

La fabbricazione dei prodotti ottici si effettua tradizionalmente in tre fasi, inizialmente avviene la formazione dello sbizzato, che viene seguita da un'operazione di rettifica o, in alcuni casi di tornitura, per far avvicinare il più possibile la forma dell'oggetto in lavorazione a quella del prodotto finito, quindi, per completare il processo, è necessaria anche una successiva lucidatura [5]. Spesso, inoltre, tra rettifica e lucidatura viene interposta un'operazione di lappatura, in particolare per la produzione di superfici sferiche.

La rettifica, la lappatura e la lucidatura sono le principali lavorazioni utilizzate per i materiali fragili, in particolare, come già detto, per la produzione di lenti sferiche, dove sono impiegate tutte e tre, e per quelle asferiche dove, nelle applicazioni più recenti, la seconda non viene usata, grazie alla gran quantità di materiale che viene asportato in modo duttile [68].

Tali tecniche sono comunemente impiegate sia per la produzione di lenti in vetro, sia per ottenere stampi in vetro che sono poi utilizzati per la produzione di lenti in resina, siano esse sferiche, asferiche o toriche.

Le metodologie utilizzate per la lavorazione meccanica di superfici in vetro, nel corso degli ultimi due secoli, sono svariate e non saranno presentate, ma, per un'ampia panoramica sulle stesse fino ai primi anni '80, si può far riferimento agli studi di J.P. Marioge sulla fabbricazione di superfici asferiche, dove vengono descritte numerose tecniche di lucidatura [69], di rettifica e tornitura [70].

In questo capitolo viene studiato il processo di produzione di lenti oftalmiche attuato in IODA puntando l'attenzione sulle lavorazioni di rettifica e lucidatura di stampi in vetro.

## ***V.2 Il processo produttivo indagato***

Il processo di fabbricazione di una lente oftalmica in resina consiste essenzialmente di tre fasi:

- la produzione di uno stampo in vetro,
- la tempra chimica di tale stampo,

- l'iniezione di una resina nello stampo (casting),
- l'eventuale lavorazione della superficie posteriore della lente in un laboratorio ottico.

Il primo punto riguarda la trasformazione di sbazzati in stampi, attraverso lavorazioni ad asportazione di truciolo di rettifica e di lucidatura, aspetto descritto sommariamente nel capitolo precedente. Una volta terminata tale fase, che si conclude con la lucidatura, allo stampo viene assegnato un nome per poterlo rintracciare ed utilizzare ogni qualvolta se ne presenti la necessità.

A questo punto viene eseguita, sui pezzi in vetro, una tempra chimica, al fine di conferire agli stampi una maggiore resistenza. Tale processo termico avviene in sale fuso, potassio nitrato con il 5% di acido silicico, per una durata complessiva di 4 ore, ed a una temperatura di 450°C.

Lo stampo ora risulta completato e pronto per essere utilizzato per la produzione di lenti organiche.

Le due parti in vetro che compongono lo stampo, quella concava e quella convessa, sono poste con le rispettive superfici lavorate una di fronte all'altra e trattenute da una guarnizione, successivamente al loro interno viene iniettata una resina organica, con nome commerciale CR39, con un opportuno catalizzatore, come illustrato in figura 56. Il tutto è sottoposto ad un ciclo termico della durata di 19 ore, durante le quali la temperatura passa da 35°C a 72°C, al termine del quale la resina risulta indurita e va a costituire la lente finita o semifinita.



**Figura 56** Iniezione della resina organica Cr-39 tra gli stampi.

La lente semifinita è destinata alla lavorazione della superficie posteriore in un laboratorio ottico di ricettazione, mentre la lente finita, impiegata per le lenti con caratteristiche di correzione standard, è destinata ai trattamenti superficiali, quali la colorazione, l'antigraffio e l'antiriflesso.

Nel seguito saranno trattate in maniera approfondita le lavorazioni di rettifica e di lucidatura degli stampi in vetro, puntando l'attenzione sugli aspetti inerenti alla dinamica delle lavorazioni e ai parametri di lavorazione.

### **V.3 Rettifica**

#### **V.3.1 Cenni sullo stato dell'arte**

Le basi teoriche per la previsione della quantità di materiale asportato, nella lavorazione meccanica del vetro, sono state poste, verso la fine degli anni '20, da F.W. Preston, nel corso dei suoi studi sulla lucidatura del vetro piano [71], [72]. Viene qui mostrato come si abbia una buona evidenza sperimentale del fatto che, la quantità di materiale asportato in una lucidatura di durata  $t$ , sia proporzionale al prodotto del tempo  $t$ , per la pressione esercitata dall'utensile  $p$ , per la velocità relativa  $v$  tra utensile e parte lavorata [71].

Tale relazione è stata espressa in varie forme, tutte equivalenti, come quella proposta da Takahashi e Funkenbusch [73]

$$(44) \quad V_p = C_p \cdot A \cdot p \cdot v \cdot t$$

dove  $V_p$  rappresenta il volume di truciolo asportato, mentre  $C_p$  è il coefficiente di Preston.

Diversamente Ong e Venkatesh [74] esprimono tale equazione in funzione della velocità di asportazione del materiale  $dT/dt$  e della velocità relativa tra pezzo ed utensile  $ds/dt$

$$(45) \quad \frac{dT}{dt} = kp \frac{ds}{dt}$$

dove  $k$  è il coefficiente di Preston.

Le relazioni precedenti sono state ritenute, nel corso di studi successivi, di validità generale, non per la sola operazione di lucidatura, ma anche per quella di rettifica. Molti autori hanno provveduto a calcolare i valori dei coefficienti di Preston, alcuni dei quali, raccolti da Fiedler [5], sono riportati in tabella 2.

Processi di lavorazione	Coefficienti di Preston [ $10^{-13} \text{ Pa}^{-1}$ ]
Fixed abrasive brittle mode grinding	2-10
Loose abrasive brittle mode grinding	30-101
Fixed abrasive shear mode grinding	0.05-0.15
Loose abrasive shear mode grinding	4-23
Full lap polishing (pitch of polyurethane lap)	6-10

**Tabella 2 Valori dei coefficienti di Preston per diverse lavorazioni.**

In una lavorazione meccanica, con asportazione per mezzo di abrasivi, è lecito pensare alla forza  $F$  come al prodotto della pressione  $p$  esercitata dall'utensile sul pezzo per l'area di contatto  $A$ , così come la lunghezza percorsa  $l$  si può esprimere come prodotto della velocità relativa  $v$  tra utensile e pezzo per il tempo  $t$ . Si ottiene quindi un'equazione perfettamente identica a quella di Preston, a partire dall'ipotesi di Reye sull'usura abrasiva e non più da dati sperimentali.

$$(46) \quad V = k \cdot A \cdot p \cdot v \cdot t$$

Nel corso di un recente studio dell'influenza delle vibrazioni sulla rettifica deterministica di componenti ottici, Li Gracewski, Funkenbusch e Ruckman [76] hanno proposto un metodo per calcolare il coefficiente di Preston a partire dall'analisi della rettifica in più passate. Infatti, essi hanno dimostrato come, all'aumentare del numero di passate, la profondità di passata attuale  $d_c$  tenda al valore programmato  $d_{c0}$ .

Dalla combinazione dell'equazione di Preston

$$(47) \quad \frac{dV}{dt} = C_p F V_s$$

dove  $F$  è la forza normale di rettifica e  $v_s$  è la velocità superficiale tra utensile e pezzo nel punto di lavorazione, con la relazione geometrica

$$(48) \quad \frac{dV}{dt} = d_c 2\pi r v_c,$$

dove  $d_c$  è la profondità di passata,  $r$  è la posizione radiale dell'utensile e  $v_c$  è la velocità di avanzamento orizzontale della mola, si ottiene

$$(49) \quad C_p = \frac{d_c(r,n) 2\pi r v_c}{F v_s},$$

che per un elevato numero di passate diventa

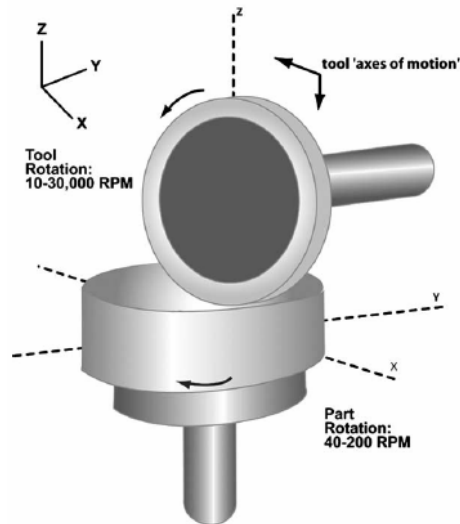
$$(50) \quad C_p \approx \frac{d_{c0} 2\pi r v_c}{F v_s}.$$

La forza normale di rettifica può essere espressa come prodotto della deflessione della mola  $T(r,n)$  per la rigidità della macchina  $k_m$ , quindi, conoscendo quest'ultima è possibile valutare il coefficiente di Preston dalla misura della flessione dell'utensile in condizioni stazionarie di rettifica.

Di tutti i processi di lavorazione di componenti ottici in vetro, la rettifica è indubbiamente quello maggiormente studiato, nonché quello che probabilmente gioca il ruolo più importante. Infatti, le ricerche hanno evidenziato come sia elevata l'influenza di tale fase sui tempi e sui risultati di quelle che la seguono nel processo produttivo.

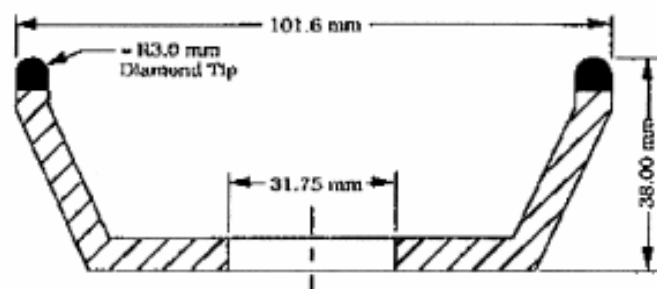
Negli studi più recenti sono state utilizzate principalmente due tipologie di macchine, la prima è una Nanotech™ AG 150 impiegata dal gruppo afferente al Center for Optics Manufacturing di Rochester ed al dipartimento di ingegneria meccanica dell'università della stessa località statunitense (Funkenbusch, Takahashi, Li, Gracewski, Ruckman). Tale macchina è una microrettifica deterministica multiasse a controllo numerico, dotata di due alberini portautensili, che, come si può vedere dalla schematizzazione di figura 57, presenta una meccanica di asportazione pressoché identica a quella della ASM 100 CNC della Optotech presente in I.O.D.A..

La seconda è invece un centro di lavorazione a controllo numerico a 4 assi, utilizzato principalmente con mola a tazza per generare superfici asferiche, descritto da Van Ligten [77].



**Figura 57 Schema della rettifica Nanotech™ AG 150.**

Tale macchina è stata più volte utilizzata negli studi di Venkatesh, Zhong ed altri [68], [78], presso la Nanyang Technology University di Singapore prima e, tuttora, dallo stesso Venkatesh e dagli altri ricercatori della University Teknologi Malaysia [79]. Per completezza riportiamo in figura 58, la rappresentazione della mola a tazza, con grana diamantata e matrice in resina, che è stata maggiormente utilizzata su tale centro di rettifica.



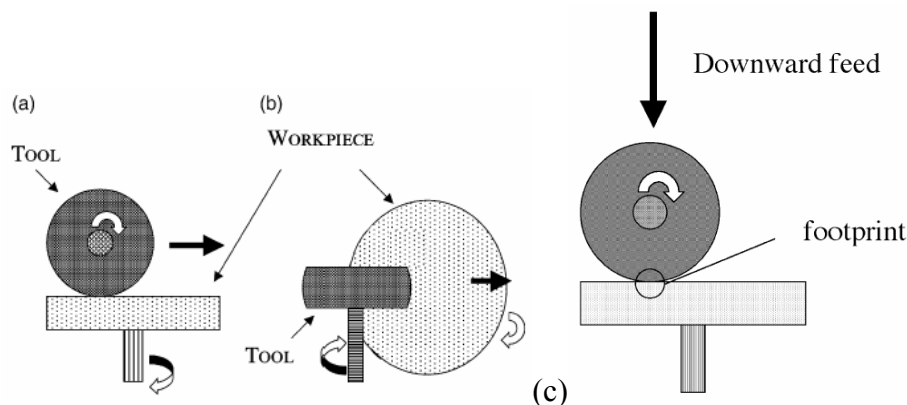
**Figura 58 Mola a tazza con grana diamantata e matrice in resina.**

L'usura dell'utensile è un processo complesso che dipende da molti parametri di processo, così come dalla composizione di pezzo ed utensile. Il più delle volte l'usura della mola è specificata in termini di rapporto G (rapporto tra il volume di pezzo rimosso ed il

volume di utensile consumato) e quanto più grande è  $G$ , tanto più a lungo la mola potrà essere usata, senza che il suo profilo sia significativamente alterato rispetto alla sua forma iniziale.

Al contrario, se  $G$  fosse troppo alto, l'usura potrebbe risultare insufficiente ad asportare i grani abrasivi consumati e rimpiazzarli con quelli nuovi che si trovano all'interno dell'utensile, processo quest'ultimo noto come “self-sharpening” o “self-dressing”, costringendo ad utilizzare quindi, per  $G$ , un valore di compromesso tra le due necessità.

I cambiamenti introdotti dall'usura nel profilo della mola, in una rettifica deterministica a controllo numerico di componenti ottici di precisione sono stati studiati da Li, Funkenbusch, Gracewski e Ruckman [59] attraverso l'analisi dell'impronta lasciata dall'utensile su una superficie di prova. Nel corso dei loro studi presso il Center for Optics Manufacturing di Rochester, Li, Funkenbusch, Gracewski e Ruckman hanno prodotto una serie di provini cilindrici in vetro Schott BK7, utilizzando la già presentata rettifica a controllo numerico Nanotech™ AG 150, secondo lo schema riprodotto in figura 59 (a, b).

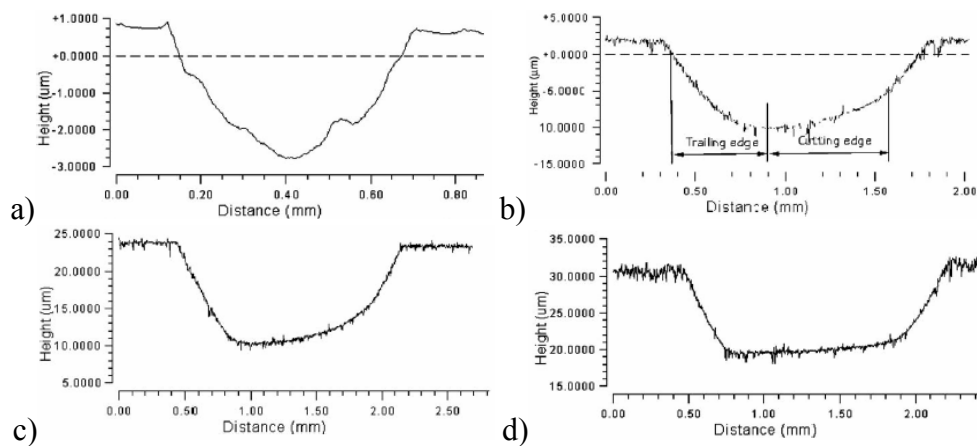


**Figura 59** Lavorazione di provini cilindrici con una rettifica Nanotech™ AG 150 (a,b) e schematizzazione del metodo d'indagine del profilo della mola (c).

Tali provini sono poi stati nuovamente lavorati a mandrino porta pezzo bloccato, secondo lo schema di figura 59 c, in modo da poter così valutare l'evoluzione della forma del profilo della mola attraverso un metodo indiretto, ovvero confrontando l'impronta (footprint) lasciata dall'utensile, per una profondità di passata di 5-10  $\mu\text{m}$ , su campioni rettificati per tempi via, via crescenti. In figura 60 sono riportate alcune misure del profilo dell'utensile, effettuate con un interferometro Zygo NewView 2000, eseguite dopo dressing e dopo aver asportato rispettivamente 50, 250, 400  $\text{mm}^3$  di vetro BK7. Dall'osservazione dell'andamento delle



impronte si nota come si abbia un notevole spianamento del lato della mola, quello nella parte destra dei profili, che effettua l'operazione di taglio, con il più basso punto di taglio che si sposta progressivamente sempre più a sinistra. Inoltre si evidenzia un allargamento della zona di contatto tra utensile e pezzo che passa da 0.6 mm, dopo l'effettuazione del dressing, fino a 1.8 mm dopo aver asportato 400 mm<sup>3</sup> di materiale.



**Figura 60** Evoluzione del profilo della mola dopo dressing (a) e rispettivamente dopo aver asportato 50 (b), 250 (c), 400 mm<sup>3</sup> (d) di vetro Schott BK7.

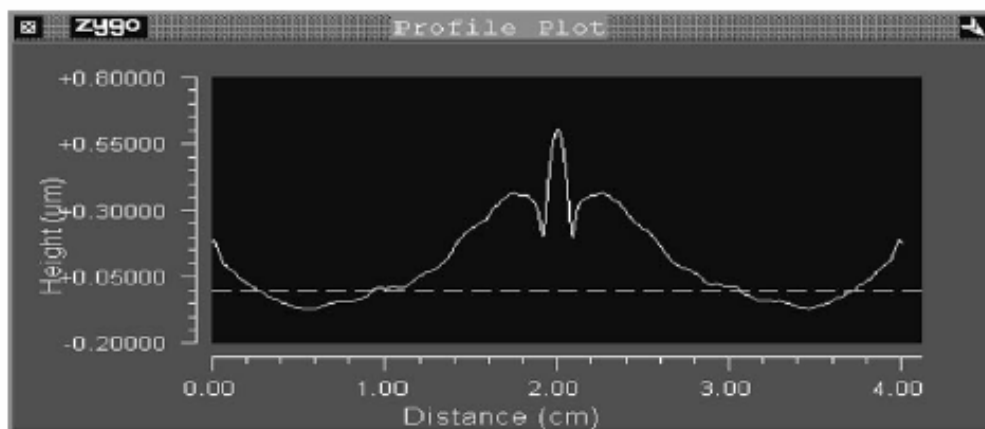
I cambiamenti che si presentano nel profilo di taglio della mola, affliggono l'accuratezza della rettifica, con un effetto che diviene dominante nel caso di superfici concave, poiché la natura di tali superfici limita l'ampiezza dell'utensile, il cui ridotto profilo di taglio cambia più rapidamente. Viene così introdotto un errore di forma nel centro del pezzo lavorato, dovuto all'usura della mola.

Infatti, nella rettifica, il percorso dell'utensile è programmato in base alla posizione del più basso punto di taglio della mola, poiché tale punto è quello che tipicamente controlla la forma finale della superficie. Quando tale punto devia dalla sua posizione originale, usata per programmare il percorso utensile, a causa dei cambiamenti del profilo di taglio della mola, può generarsi un errore di forma.

In una rettifica di una superficie piana, con utensile integro, così che il più basso punto di taglio sia nel centro della mola, l'operazione procede dal bordo fino al centro del pezzo, ed il centro dell'utensile è allineato con il centro del provino alla fine della lavorazione. Sull'utensile consumato il più basso punto di taglio non si trova più lungo il suo centro, così

che il percorso utensile programmato non è in grado di far passare tale punto sopra il centro del pezzo. Perciò viene lasciato un lieve picco nel centro del pezzo al termine della rettifica, con più basso punto di taglio spostato a sinistra rispetto al centro dell'utensile.

Un esempio di tale effetto si può notare in figura 61, dove viene mostrato l'andamento del profilo di un provino piano in vetro BK7, lavorato dopo che la mola aveva asportato 250 mm<sup>3</sup> di materiale successivamente al dressing.



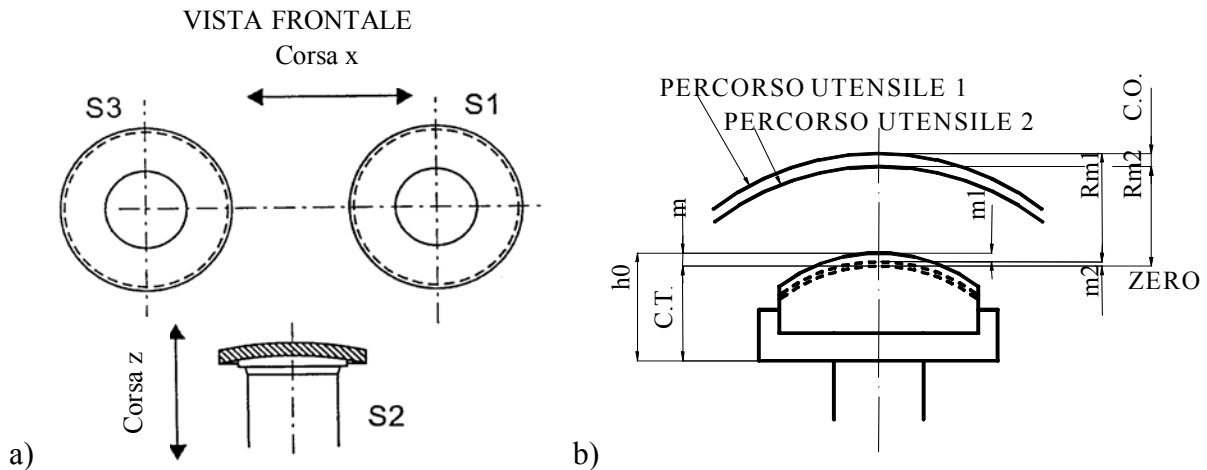
**Figura 61** Errore di forma nel centro di un provino piano di vetro Schott BK7.

Pur essendo il vetro un materiale fragile, in particolari condizioni di lavorazione è possibile giungere a condizioni di rettifica in campo duttile. In questo contesto non approfondiremo l'argomento non viene approfondito, in quanto tale condizione non si è presentata nelle lavorazioni prese in esame. Per un approfondimento dei meccanismi che intervengono nella rettifica in campo duttile si rinvia a [65].

### V.3.2 Dinamica della lavorazione

Le parti della macchina che realizzano la lavorazione di rettifica sono rappresentate nella seguente figura 62 a. In tale schema si possono distinguere l'albero porta pezzo S2, ad asse verticale, con presa sulla lente ad aria compressa, che ruota attorno all'asse z e trasla lungo la stessa direzione, ed i due alberi orizzontali S1 e S3, sui quali sono montate rispettivamente le mole di sgrossatura e di finitura, che ruotano attorno al proprio asse e traslano orizzontalmente.

I parametri da impostare prima di avviare la lavorazione sono diversi, quindi, per renderne più semplice la comprensione, si farà riferimento alla catena dimensionale della rettifica rappresentata in figura 62.



**Figura 62 Vista frontale (a) e catena dimensionale della rettifica (b).**

Dopo aver misurato, con un comparatore, l'altezza iniziale  $h_0$  dello stampo ancorato all'albero porta pezzo ed aver scelto l'altezza di materiale  $m$  da rimuovere al centro, per conferire la forma desiderata, si perviene alla determinazione del "center thickness", primo parametro da impostare nell'interfaccia utente, dato dall'equazione:

$$(51) \quad C.T. = h_0 - m$$

Una volta stabilito lo spessore di materiale  $m_2$ , che si vuole asportare con la mola di finitura, si determina il "contour offset", attraverso la differenza tra i due raggi delle mole, quello  $R_{m1}$  dell'utensile di sgrossatura e quello  $R_{m2}$  relativo all'utensile di finitura:

$$(52) \quad C.O. = R_{m1} - R_{m2} + m_2$$

Il parametro appena ricavato, anch'esso da impostare in macchina per eseguire la lavorazione, rappresenta la distanza tra i percorsi compiuti dal centro di rotazione dell'utensile in due passate successive, ed in particolare, nel caso di più passate successive con la stessa mola, equivale alla quantità di materiale che viene lasciata da asportare alle passate successive.

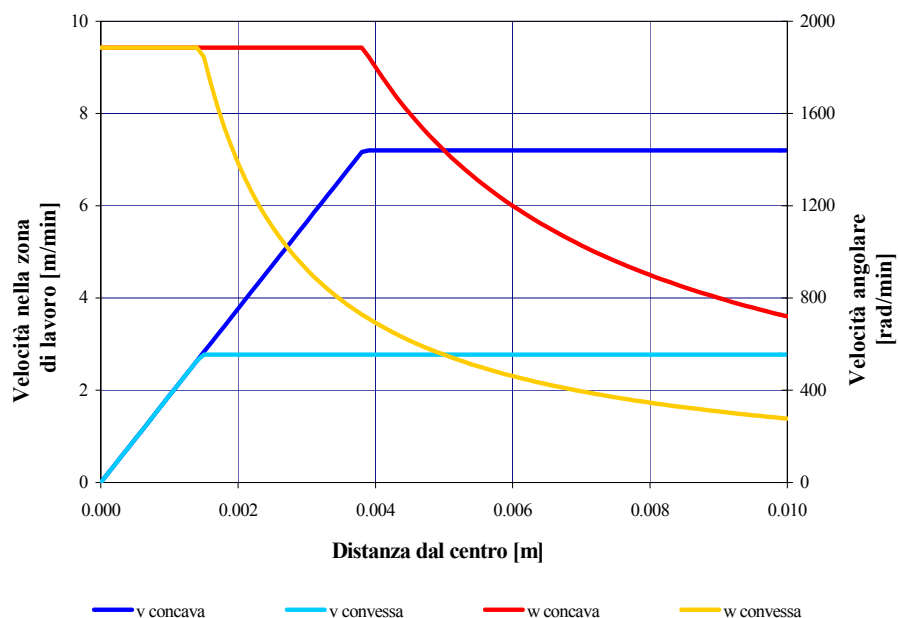
Infine, per ciascun utensile, vanno impostati anche i seguenti parametri:

- stock removal: spessore del materiale asportato,

- number of passes: numero di passate in cui viene asportato lo stock removal,
- spindle speed: velocità di rotazione dell'utensile,
- surface speed: velocità tangenziale iniziale del mandrino porta pezzo,
- max spindle speed: massima velocità di rotazione del mandrino porta pezzo.

La velocità tangenziale del mandrino porta pezzo (surface speed) rimane costante fino a quando la velocità angolare non raggiunge il valore limite (max spindle speed) impostato dall'operatore, dopo di che la velocità tangenziale della lente inizierà a scendere linearmente fino ad annullarsi nell'origine. Tali velocità vengono però valutate nel centro dell'utensile, risultando pertanto diverse da quelle che si hanno effettivamente nella zona di lavoro.

Per meglio comprendere l'andamento delle velocità tangenziali ed angolari nel punto di lavoro, ci si rifà allo studio del comportamento per una lente concava e d una convessa. Ipotizzando le lenti entrambe sferiche, con raggi di curvatura di 90 mm, utilizzando una mola di diametro 80 mm, con velocità tangenziale iniziale e velocità angolare limite del mandrino  $v'=4$  m/min e  $\omega=300$  rpm ( $\omega=1885$  rad/min) rispettivamente, si ottiene quanto riportato nel grafico di figura 63.



**Figura 63 Andamenti delle velocità tangenziali, nella zona di contatto tra utensile e lente, e delle velocità angolari dello stampo, per una geometria concava e per una geometria convessa.**

Nel tratto iniziale, dove la velocità tangenziale  $v'$  (surface speed) risulta costante, indicando con  $R$  il raggio di curvatura locale del pezzo nel punto di lavorazione e con  $R'$  la distanza del centro di curvatura del pezzo nel punto di lavorazione dall'asse di rotazione dell'utensile, la velocità tangenziale nella zona di contatto  $v$  può essere espressa dalla relazione

$$(53) \quad v = v' \cdot \frac{R}{R'} = v' \cdot \frac{R_L}{(R_L \pm R_m)}$$

dove  $R_L$  è il raggio di curvatura della lente,  $R_m$  il raggio della mola, mentre il segno  $+$  si utilizza nel caso di lenti convesse, il segno  $-$  nel caso di lenti concave.

La velocità  $v'$  resta costante fino a quando la velocità angolare  $\omega$  non raggiunge il suo limite superiore (max spindle speed), dopo di che sarà la velocità tangenziale a scendere linearmente, mentre  $\omega$  rimane costante. In tal caso la velocità tangenziale varierà linearmente secondo la seguente relazione

$$(54) \quad v = \omega \cdot R$$

Si nota immediatamente come, a parità di parametri di lavorazione impostati, le lenti concave abbiano velocità nella zona di lavoro, sia tangenziali che angolari, maggiori. Bisogna, quindi, utilizzare velocità tangenziali  $v'$  (surface speed) minori per le lenti concave, rispetto a quelle usate nel caso di lenti convesse, per poter avere le stesse condizioni di lavoro.

### V.3.3 Modelli della lavorazione

La normative ISO 3274: 1996 [81] e ISO 4287: 1997 [82] propongono una scomposizione di un profilo acquisito, attraverso l'applicazione di opportuni filtri, in 3 componenti che sono il profilo primario, il profilo di ondulazione e il profilo di rugosità. Nel caso della rettifica con ASM 100 CNC il profilo di rugosità è essenzialmente legato ai parametri macchina, alla sua rigidità, ai materiali degli utensili e al materiale del pezzo in lavorazione e da tipicamente informazioni inerenti ad errori microgeometrici dipendenti soprattutto dalla dimensione della grana della mola; il profilo di ondulazione è legato alla dimensione degli utensili, alla curvatura della lente e al passo di avanzamento, e correla

l'errore geometrico con i parametri relativi al ciclo di lavorazione; il profilo primario è legato nuovamente ai materiali degli utensili, al materiale del pezzo in lavorazione e ai parametri macchina, alla sua rigidità, e da informazioni sull'errore macrogeometrico commesso nella lavorazione.

Per ciascuna delle componenti dello stato superficiale è possibile sviluppare un modello teorico che preveda il risultato ottenuto, in modo da poter conoscere preventivamente lo stato superficiale e poter quindi agire preventivamente al fine di giungere ad un'ottimizzazione del processo.

Per la caratterizzazione del profilo di rugosità è stato proposto e validato un metodo basato sulla funzione di Weistrass-Mandelbrot che, attraverso tecniche frattali, consente la simulazione del profilo di rugosità nel caso della rettifica in campo fragile. Per un approfondimento del primo modello si rimanda a [64], [92].

Il profilo di ondulazione e il parametro  $W_z$ , possono essere ricavati in prima approssimazione per via geometrica come schematizzato nella figura 64. In questo modo si ottiene:

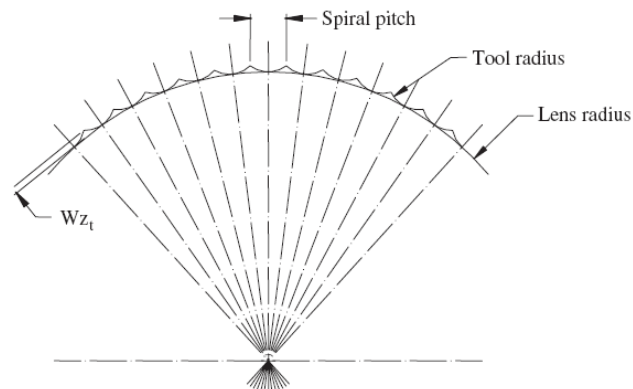
$$(55) \quad W_z = R + R_u - \left( \sqrt{R^2 + (p/2)^2} + \sqrt{R_u^2 + (p/2)^2} \right)$$

$$(56) \quad W_z = R - R_u - \left( \sqrt{R^2 + (p/2)^2} - \sqrt{R_u^2 + (p/2)^2} \right)$$

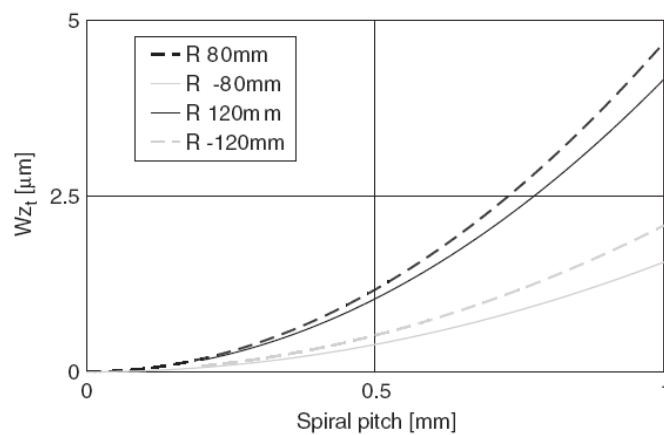
dove  $R$  rappresenta il raggio della lente,  $R_u$  il raggio dell'utensile e  $p$  il passo di avanzamento della spirale in rettifica. La (55) risulta valida per lenti convesse, mentre la (56) è da usarsi per lenti concave.

A titolo esemplificativo si riporta in figura 65 l'andamento del parametro di ampiezza dell'ondulazione  $W_z$  in funzione del passo spirale per diversi raggi di curvatura della lente con un raggio dell'utensile pari a 40 mm.

Per quanto riguarda l'errore macrogeometrico in rettifica, strettamente correlato al profilo primario, si sta sviluppando e validando un modello basato sugli studi di Funkenbusch [76].



**Figura 64** Schematizzazione della dipendenza del profilo di ondulazione e del parametro  $Wz$ , dal passo spirale, dal raggio utensile e dal raggio della lente, per una lente rettificata.



**Figura 65** Effetto teorico del passo spirale e del raggio della lente sul parametro di ondulazione  $Wz$ .

### V.3.4 Valutazioni sperimentali

#### V.3.4.1 Pianificazione sperimentale

Per indagare l'effetto dei parametri di lavorazione sullo stato superficiale sono stati realizzati provini di rettifica che presentano geometrie concave, convesse, sferiche, asferiche e piane. In tabella 3 e tabella 4 sono riportati tutti i provini rettificati per le valutazioni sperimentali e i relativi parametri di lavorazione, nonché quelli realizzati per essere successivamente lucidati.

Finitura																					
Numero di passate			1			1					1										
Profondità di passata [mm]			0.04		0.04		0.07		0.1		0.14		0.19		0.7		0.7				
Velocità iniziale tangenziale [m/min]			2			2					2					2					
Velocità massima di rotazione del mandrino [rpm]			200			200					200					200					
Velocità di rotazione dell'utensile [rpm]			8000			8000					8000		10000		8000		8000				
Passo spirale [mm]			0.5		0.7		0.9		0.9					0.7		0.5		0.9		0.7	
Numero di passate			3			3					2					2					
Profondità di passata [mm]			0.7			0.7					0.7					0.7					
Velocità iniziale tangenziale [m/min]			4			4					4					2					
Velocità massima di rotazione del mandrino [rpm]			300			300					300					300					
Velocità di rotazione dell'utensile [rpm]			6000			6000					6000					6000					
Contour offset [mm]			0.04			0.04		0.07		0.1		0.14		0.19		0.15			0.15		
Passo spirale [mm]			0.5		0.7		0.9		0.9					0.7		0.5		0.9		0.7	
Coefficiente di asfericità			1			1					-1.8					-0.5					
Raggio di curvatura [mm]			91.57			91.57					132.450					57.510					
Quantità			3			1					4		1		11						
Materiale			Schott CH-W 0991																		
Denominazione campione			A	B	C	S1	S2	S3	S4	S5	D1	D2	D8	D9	E1						

Tabella 3 Parametri impiegati per la realizzazione dei campioni analizzati in vetro Schott.



Finitura		Numero di passate		2		2		2		2		3		4		5		1	1
		Profondità di passata [mm]		74/50	124/50	89/35		99/25		114/10		109/10/5	108/10/3/3	109/10/3/1/1		100	100		
Velocità iniziale tangenziale [m/min]		2		2														2	2
Velocità massima di rotazione del mandrino [rpm]		15		15														25	25
Velocità di rotazione dell'utensile [rpm]		8000		8000														8000	8000
Passo spirale [mm]		0.5		0.5														0.4	0.4
Numero di passate		4		4														4	4
Profondità di passata [mm]		1		1														0.75	0.75
Velocità iniziale tangenziale [m/min]		3.5		3.5														3.5	3.5
Velocità massima di rotazione del mandrino [rpm]		40		40														50	50
Velocità di rotazione dell'utensile [rpm]		1000		1000														6000	6000
Contour offset [mm]		0.15	0.2	0.2														0.2	0.2
Passo spirale [mm]		0.5		0.5														0.7	0.7
Quantità		1	7	1	1	1	1	1	1	1	1	6							3
Materiale		B23-59 Corning, K5 Schot																	
Denominazione campione		M8.1	M8.2-M8.8	CD.1	CD.2	CD.3	CD.4	CD.5	CD.6	M9	S9 r=60mm								

In particolare la velocità di rotazione dell'utensile di finitura è stata analizzata attraverso i campioni D1 e D2 sui quali sono stati eseguite misure di rugosità in direzione radiale in direzione radiale lungo l'asse.

L'effetto della profondità di passata è stato indagato sui provini S1-S5 attraverso misure di rugosità eseguite in direzione radiale in varie posizioni assiali.

L'influenza del passo spirale sul profilo di ondulazione è stata analizzata sui provini A-C convessi e sui campioni D1, D8, D9 concavi attraverso l'analisi dell'ondulazione.

Sui campioni E1 è stata eseguita un'analisi della rugosità superficiale in direzione radiale e tangenziale in vari punti disposti su una direzione radiale, al fine di valutare la ripetibilità della lavorazione. Sui medesimi campioni sono stati rilevati alcuni profili con profilometro per l'analisi dell'errore di forma.

I campioni CD sono stati realizzati per verificare la possibilità di eseguire una rettifica in campo duttile, mentre i campioni M8, M9, S9 sono stati realizzati per lo studio della lucidatrice ASP 200 CNC.

Gli strumenti di misura impiegati nelle valutazioni dello stato superficiale in rettifica sono il profilometro-rugosimetro SURFCOM 1800D e il microscopio a forze atomiche AFM EXPLORER TOPOMETRIX<sup>TM</sup>; per informazioni dettagliate sugli strumenti di misura si rimanda all'appendice.

Parametri dello stato superficiale indagati	$\lambda_s$ [mm]	$\lambda_c$ [mm]	$\lambda_f$ [mm]
Pa, Pz, Wa, Wz, WSm, Wsk, Wku, Ra, Rq, Rz, Rv, RSm, Rsk, Rku, Rk, Rpk, Rvk, Mr1, Mr2	0.0025	0.25	2.5

**Tabella 5 Parametri di rugosità misurati e lunghezze d'onda di filtraggio impiegate.**

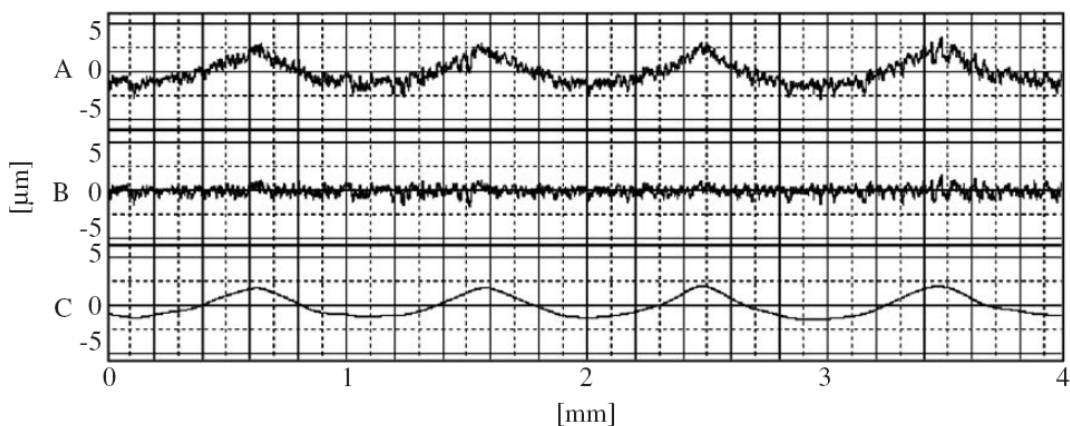
In tabella 5 sono riportati i parametri di rugosità misurati, definiti nella UNI EN ISO 4287 [82], e le relative lunghezze d'onda dei filtri [83] per la definizione dei profili primario, di ondulazione e di rugosità, senza prendere in considerazione la procedura proposta in normativa per la definizione delle lunghezze d'onda di filtraggio [84], ma utilizzando come filtro per la rugosità una lunghezza di base pari a 0.25 mm, che garantisce la possibilità di separare la componente di ondulazione legata al passo spirale, dalla componente di rugosità legata alla grana della mola e ai materiali impiegati. La lunghezza d'onda di filtraggio  $\lambda_s$

impiegata per la definizione del profilo primario fa riferimento alla normativa UNI EN ISO 3274 [81] che prevede l'impiego di un tastatore di raggio al vertice pari a  $2\text{ }\mu\text{m}$ .

#### V.3.4.2 Analisi dei risultati

Riportiamo di seguito i principali risultati ottenuti dalla analisi dei dati sperimentali, rimandando a [64] e [65] per maggiori approfondimenti e la presentazione di tutti i dati che qui non sono riportati.

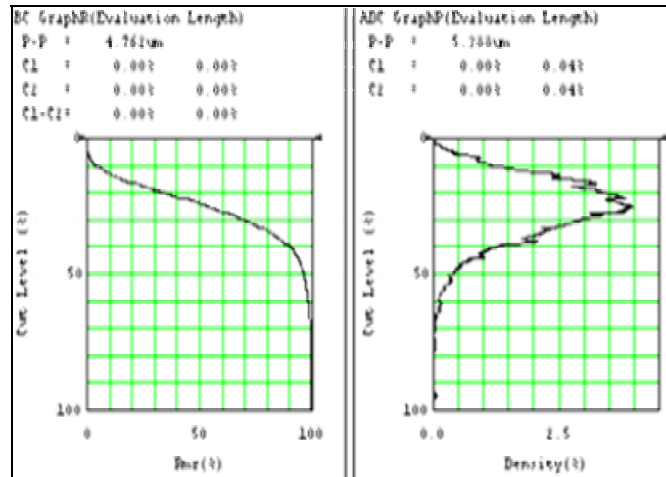
Tipicamente il profilo primario di una lente rettificata, rilevato in direzione radiale, si presenta come in figura 66 A; esso può essere interpretato come la composizione del profilo di ondulazione (figura 66 B), legato all'impronta lasciata dal passo di avanzamento dell'utensile (passo spirale), e del profilo di rugosità (figura 66 C), legato ai materiali lavorati e soprattutto alla dimensione della grana della mola di finitura.



**Figura 66 Esempio di profilo primario (A), profilo di rugosità (B) e profilo di ondulazione (C) di uno stampo rettificato.**

Tipicamente il profilo di rugosità presenta una distribuzione della percentuale della lunghezza portante del profilo in funzione dell'altezza e una curva della distribuzione dell'altezza del profilo simile a quella riportata in figura 67, le cui forme sono legate alla presenza di piccole valli molto profonde, caratteristiche delle lavorazioni di rettifica di materiali fragili; questo implica un parametro di asimmetria del profilo  $R_{sk}$  negativo che si aggira intorno a  $-0.4$ , e un rapporto tra i parametri  $R_v$  e  $R_z$  circa pari a  $0.65$ . Sempre a titolo illustrativo si riportano le immagini acquisite con AFM di un provino rettificato: in esse si

può notare la topografia tridimensionale della superficie e come appare la superficie riducendo l'area scansionata ottenendo un ingrandimento dettagliato di una piccola area.



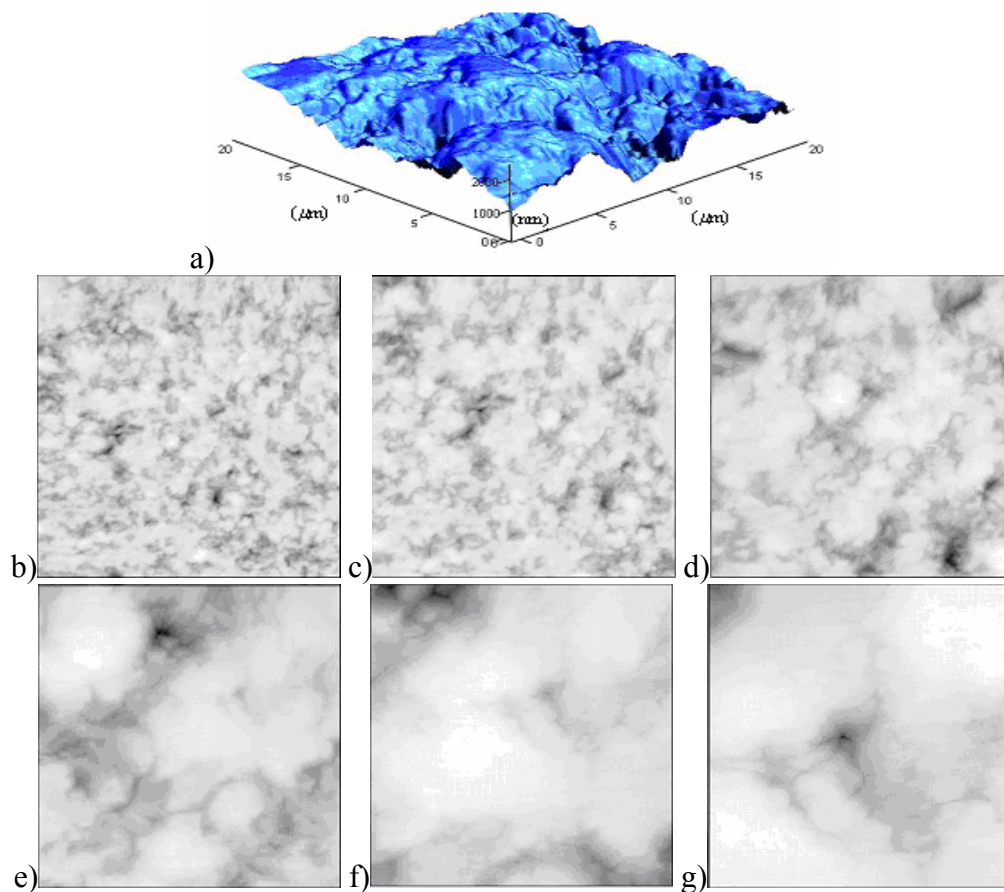
**Figura 67** Curva della percentuale della lunghezza portante del profilo in funzione dell'altezza e una curva della distribuzione dell'altezza del profilo di rugosità di uno stampo rettificato.

In figura 69 e figura 70 sono diagrammati i parametri relativi al profilo primario, al profilo di ondulazione e al profilo di rugosità, relativi allo scostamento medio del profilo e altezza massima del profilo, in funzione della distanza dal centro dello stampo in direzione radiale; i risultati delle misure presentati sono stati acquisiti in direzione radiale e in direzione tangenziale.

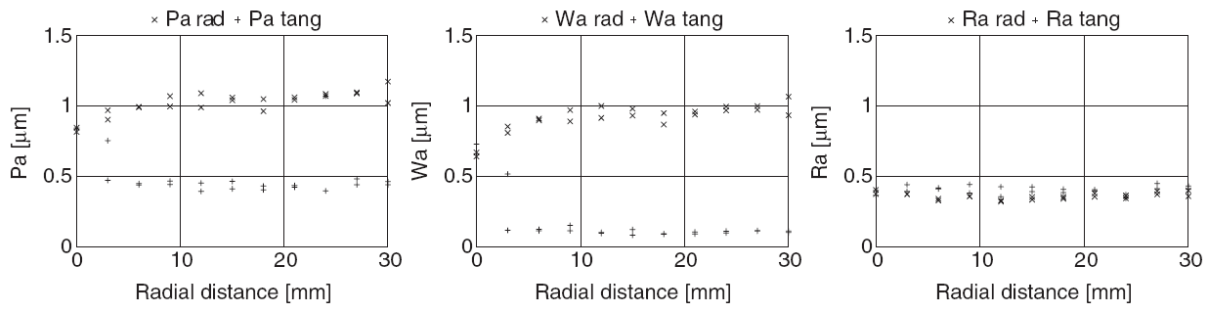
Dall'analisi dei risultati si può notare che i parametri di rugosità in direzione tangenziale e radiale rimangono pressoché costanti spostandoci dal centro dello stampo verso il bordo. In particolare è possibile notare che i parametri relativi al profilo di rugosità rimangono praticamente costanti sia in direzione radiale che in direzione tangenziale; il valore assunto dai parametri di ondulazione misurati in direzione tangenziale risultano trascurabili, mentre quelli misurati in direzione radiale, risentono dell'effetto del passo spirale e di conseguenza si attestano su valori di ampiezza massima pari a 4 μm; i parametri relativi al profilo primario possono essere interpretati come il risultato dell'analisi della composizione del profilo di rugosità e del profilo di ondulazione; conseguentemente si otterranno valori dei medesimi parametri che si attestano su valori circa costanti, maggiori nel caso delle misure eseguite in direzione radiale.

Nel caso in cui l'utensile risulti usurato l'andamento dei parametri  $R_a$ ,  $P_a$ ,  $R_q$  in direzione radiale in funzione della distanza dal centro dell'utensile presentano un valore costante verso il bordo della lente, un valore leggermente superiore avvicinandosi al centro e un valore più basso al centro dello stampo (figura 71).

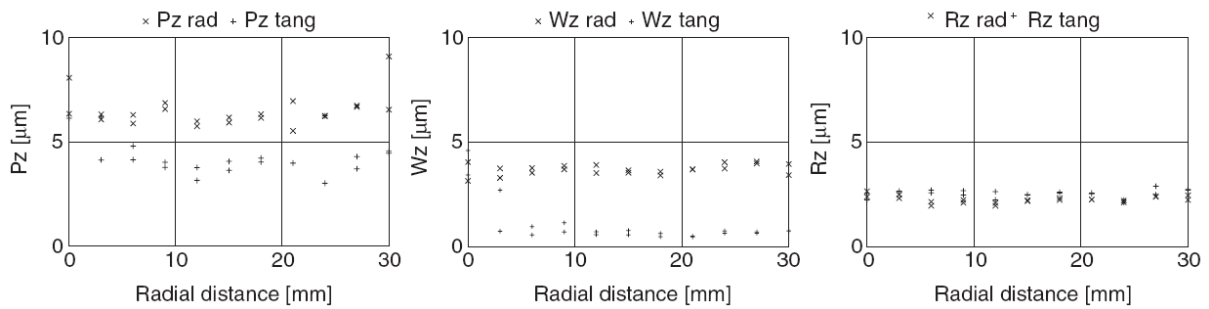
In figura 72 è possibile vedere l'andamento dei parametri  $P_a$ ,  $W_a$ ,  $R_a$  in funzione del passo spirale; in questo caso si può notare che il passo spirale non influenza i valori dei parametri, se questi sono il risultato di misurazioni fatte in direzione tangenziale; nel caso di misurazioni in direzione radiale è invece possibile notare una dipendenza dei parametri  $P_a$  e  $W_a$  dal passo spirale.



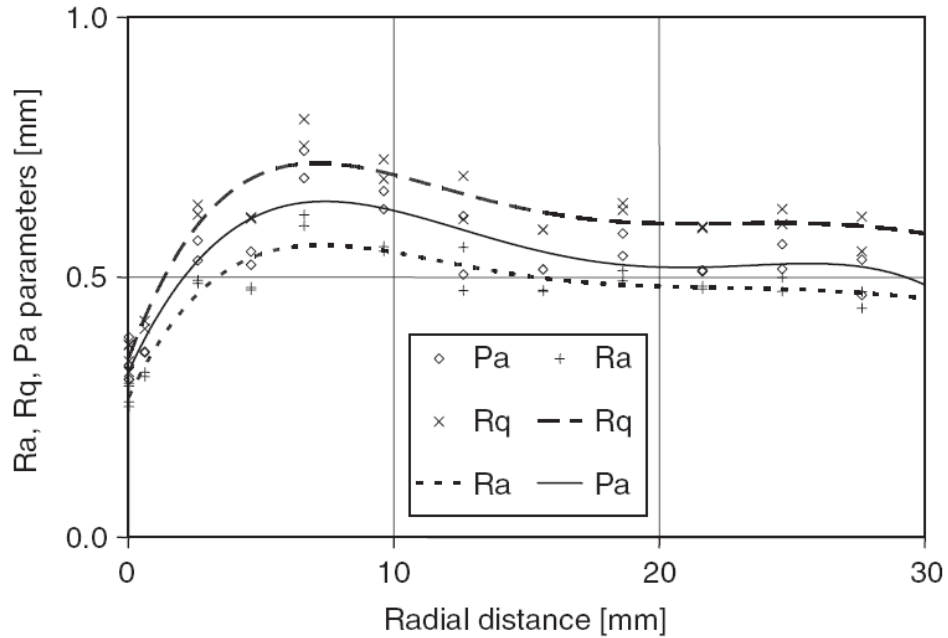
**Figura 68** Esempio di superficie rettificata acquisita con microscopio a forza atomica: mappa tridimensionale su un'area quadrata di lato  $20\text{ }\mu\text{m}$  con (a), mappe bidimensionali in scale di grigio su un'area quadrata di lato  $150\text{ }\mu\text{m}$  (b),  $100\text{ }\mu\text{m}$  (c),  $50\text{ }\mu\text{m}$  (d),  $20\text{ }\mu\text{m}$  (e),  $10\text{ }\mu\text{m}$  (f),  $5\text{ }\mu\text{m}$  (g).



**Figura 69 Parametri Pa, Wa e Ra ottenuti in rettifica, in funzione della distanza dal centro dello stampo.**



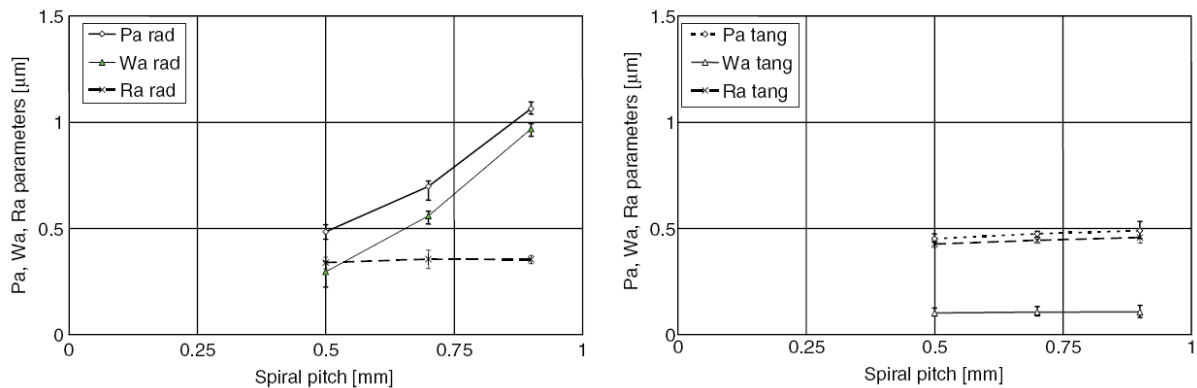
**Figura 70 Parametri Pz, Wz e Rz ottenuti in rettifica, in funzione della distanza dal centro dello stampo.**



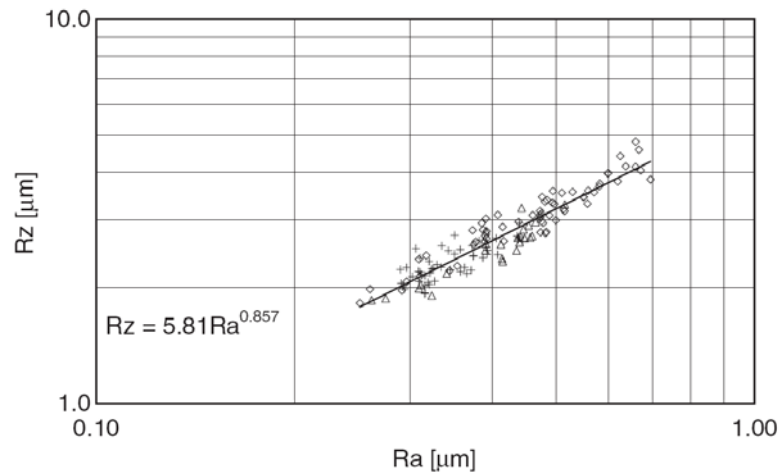
**Figura 71 Parametri Ra, Pa e Rq ottenuti in rettifica nel caso di utensile usurato, in funzione della distanza dal centro dello stampo.**

Su tutte le misure di rugosità effettuate è stato possibile individuare un'ottima correlazione tra i parametri di rugosità Ra e Rz (figura 73) definita da una legge di tipo esponenziale:

$$(57) \quad R_z = a \cdot R_a^b \quad a=5.81, b=0.857$$



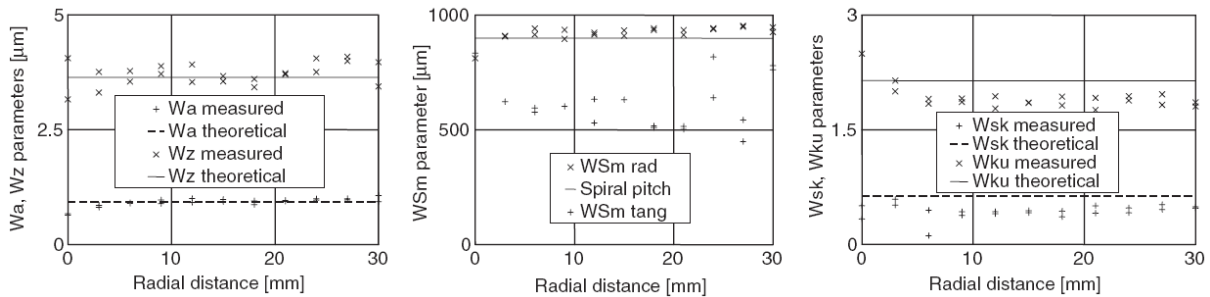
**Figura 72 Parametri Pa, Wa e Ra ottenuti in rettifica, in funzione del passo spirale in direzione radiale e tangenziale.**



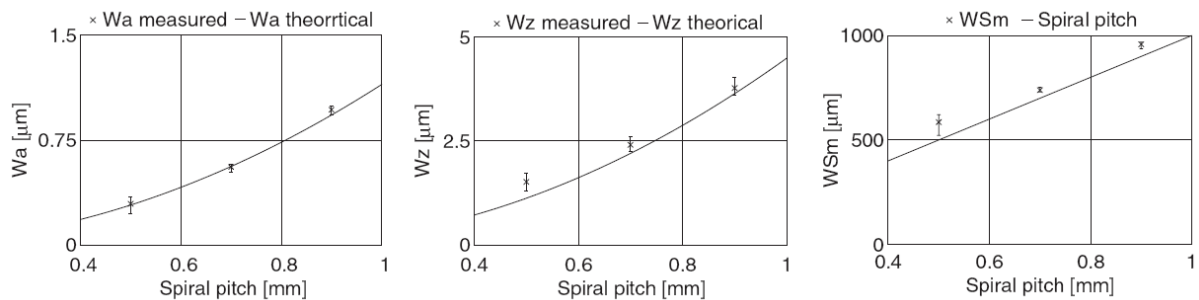
**Figura 73 Correlazione tra Ra e Rz nel caso di rettifica in campo fragile.**

Per quanto riguarda il parametro di spaziatura RSm figura 76, è stato possibile verificare che risulta praticamente costante sulla superficie della lente sia in direzione radiale che in direzione tangenziale al variare dei parametri di lavorazione. Si è inoltre notato che tale parametro risulta molto vicino alla dimensione della grana della mola impiegata che risulta pari a 35 μm.

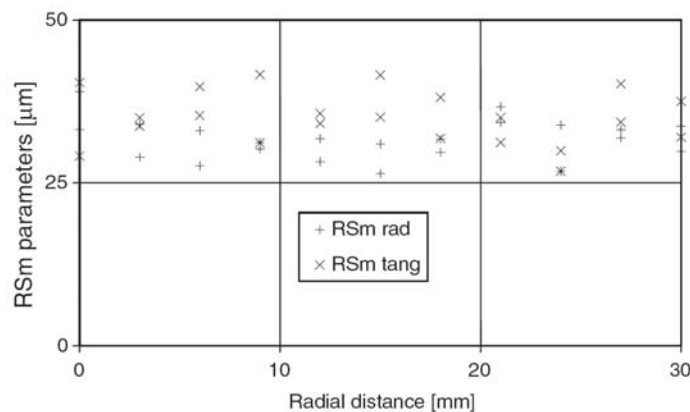
Dall'analisi delle misure di rugosità si è inoltre evinto che esiste un rapporto pressoché costante tra la rugosità  $R_{sm}$  e  $R_a$  pari a circa 78.



**Figura 74** Comparazione tra parametri di ondulazione teorici e misurati in funzione della distanza dal centro.



**Figura 75** Comparazione tra parametri di ondulazione teorici e misurati in funzione del passo spirale.



**Figura 76**  $R_{sm}$  in funzione della distanza dal centro.

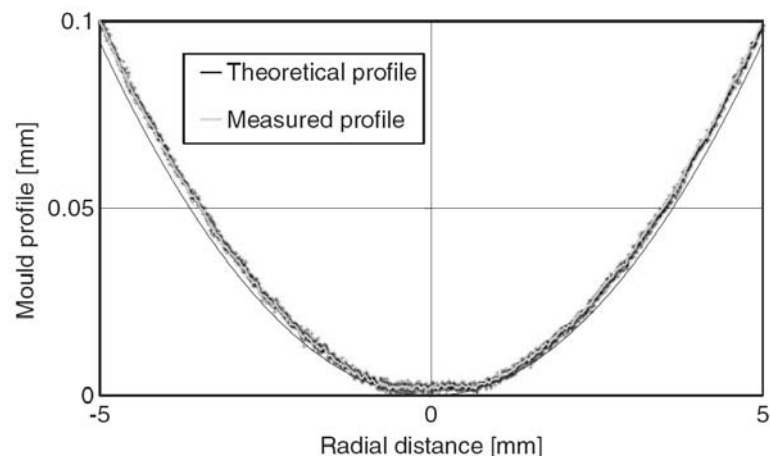
Dalle misure fatte sui campioni per i quali si è variata la velocità di rotazione dell'utensile, si è potuto desumere che questa non influenza significativamente i parametri di rugosità. Alle stesse conclusioni si è giunti analizzando campioni ottenuti variando la velocità di rotazione dell'utensile e la profondità di passata. Da misure recentemente effettuate e non



ancora analizzate sembra che questi parametri abbiano un'influenza sull'errore di forma della superficie lavorata.

I provini realizzati per la ricerca della transizione duttile fragile nella rettifica hanno messo in evidenza che i parametri di lavorazione impiegati non consentono di ottenere tale tipo di lavorazione; ciò nonostante dall'analisi delle impronte della mola di finitura sul retro dei campioni si è potuto notare la presenza di zone con lavorazione duttile sulle parti della mola che non ha lavorato la superficie. Questo porta a pensare che la mancanza di ottenimento di un risultato sia legato al materiale della matrice della mola e alla cinematica della lavorazione.

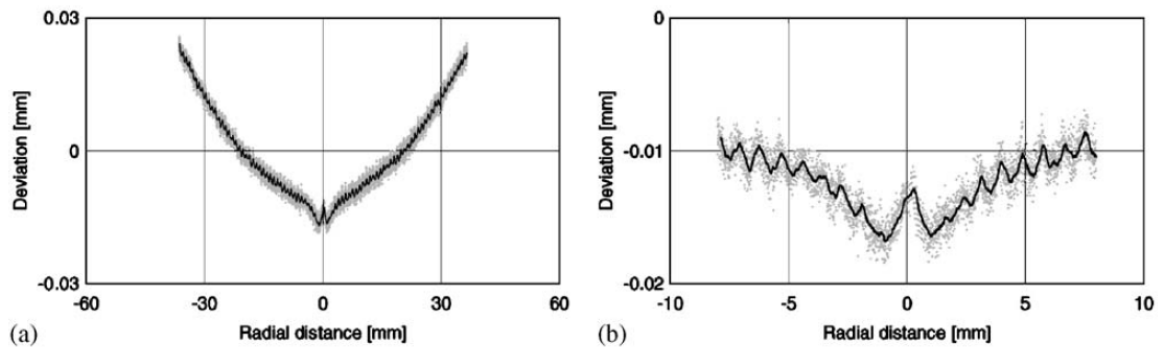
Sui profili delle lenti sono stati eseguiti due tipi analisi, la prima atta a confrontare il profilo misurato con il profilo nominale, la seconda rivolta al confronto tra la curvatura del profilo misurato e la curvatura del profilo teorico. In figura 77 e figura 78 si riporta il risultato dell'analisi relativa al profilo misurato e nominale di una lente convessa: dalla differenza tra profilo nominale e profilo misurato, valutata in direzione normale al profilo nominale, è possibile notare la presenza di due errori, il primo evidente al centro e legato all'usura dell'utensile, il secondo omogeneo e crescente dal centro della lente verso il bordo, dipendente dalla rigidità della macchina e dai parametri di lavorazione.



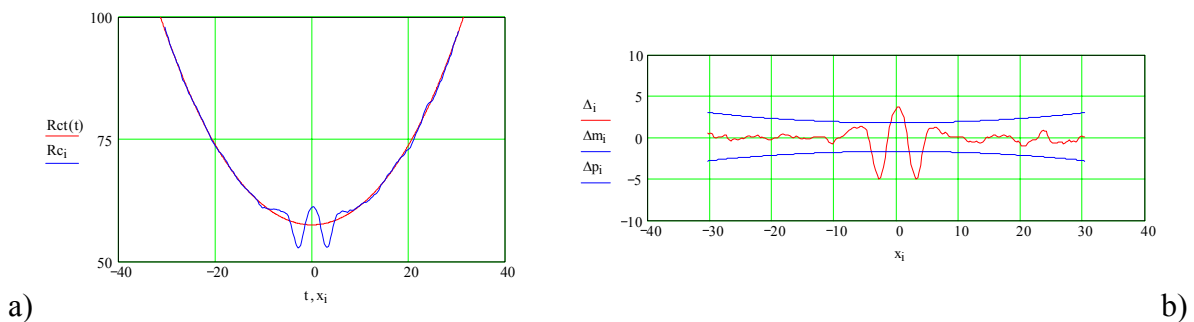
**Figura 77 Profilo teorico e profilo misurato al centro dello stampo.**

In figura 79 è possibile che, mentre l'errore legato alla rigidità della macchina e ai parametri di lavorazione non porta a errori rilevanti per quel che riguarda la curvatura, la

deviazione del profilo nominale dal profilo teorico legato all'usura dell'utensile implica una differenza tra curvatura nominale e curvatura teorica che esce dalle tolleranze definite dalla normativa [94] (riportate a valori di curvatura attraverso le relazioni viste nel capitolo III). Come si vedrà successivamente, tale errore non può essere corretto in lucidatura.



**Figura 78** Deviazione del profilo nominale dal profilo teorico dell'intero profilo dello stampo (a) e della sua zona centrale (b).



**Figura 79** Curvatura nominale e curvatura teorica (a) e relativa deviazione (b).

In (b) le curve rappresentate sotto e sopra identificano una zona di tolleranza derivata dalla normativa.

## V.4 Lucidatura

### V.4.1 Cenni sullo stato dell'arte

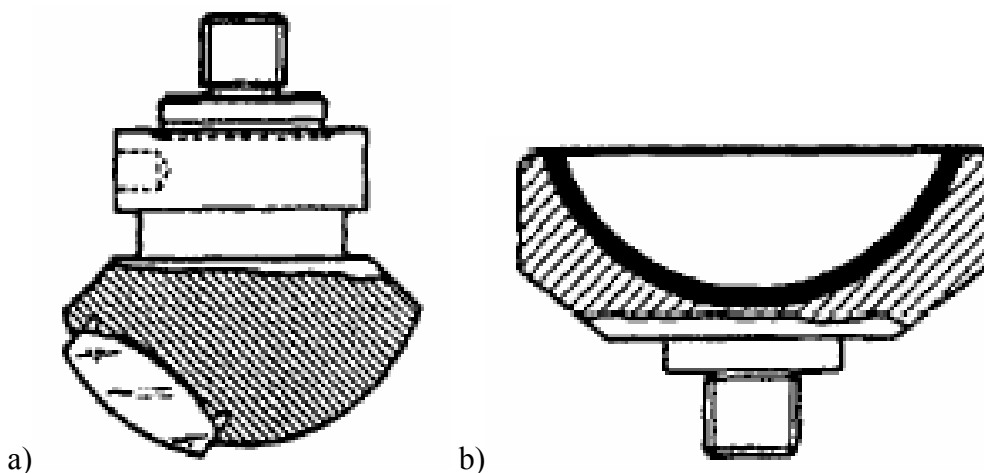
La lucidatura, ultima fase del processo di lavorazione meccanica dei prodotti ottici, è, nella maggior parte dei casi, un processo esclusivamente non deterministico, infatti, così com'è comunemente impiegata, risulta essere un'operazione a pieno contatto tra il pezzo e la membrana di lucidatura. In tale zona di contatto viene introdotto un liquido abrasivo acquoso,

per idratare la superficie del vetro, mentre la rimozione dello strato vicino alla superficie, addolcito da effetti chimici, è ottenuta attraverso un'azione abrasiva, adesiva e plastica [80].

Il liquido abrasivo è generalmente composto di ossido di cerio,  $\text{CeO}_2$ , ed acqua, mentre la membrana è costituita da particelle di poliuretano su di una piastra di rinforzo in ghisa [85].

Anche la lucidatura di stampi in vetro, per la produzione di lenti organiche, è stata studiata, presso la Nanyang Technological University di Singapore, da Ong, Venkatesh, Zhong e Wihardjo [86], che hanno utilizzato una Loh Polishing Machine, con le lenti montate su di un supporto convesso, mentre l'utensile è concavo come illustrato in figura 80 [87].

La lucidatura dei vetri, per la produzione di componenti ottici, ha suscitato notevole interesse negli ultimi decenni, particolarmente quando legata alla fabbricazione di specchi e lenti. Tale operazione può essere dovuta alla sola azione meccanica dell'abrasivo, o all'esclusivo processo chimico, ma con la combinazione dei due fenomeni si ha un notevole aumento della quantità di materiale asportato, il quale deve in ogni caso restare di modesta entità, per evitare che la lavorazione introduca errori di forma.



**Figura 80** Schema della staffa porta pezzo (a) e dell'utensile (b) per una Loh Polishing Machine.

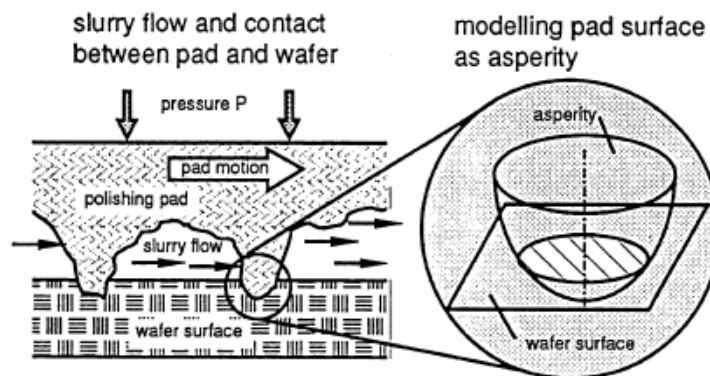
Un modello, per la parte chimica del processo di lucidatura, è stato proposto da Cook [88], il quale, illustra come si abbia la formazione di vari legami durante la lavorazione. Innanzi tutto, si ha la comparsa di legami idrogeno tra solvente e soluto nel liquido abrasivo, dove il soluto è composto sia dall'acqua, che dalle particelle di abrasivo.

Inoltre, si ha la formazione di legami idrogeno anche tra le particelle disciolte della superficie lavorata, così come si ha l'instaurarsi di legami molecolari tra le particelle che

costituiscono la superficie. Infine, si ha la rimozione delle particelle della superficie legate, che il fluido abrasivo allontana.

Come modello meccanico della rimozione viene proposto quello di Yu [89], mostrato in figura 81, nel quale per valutare la zona di contatto tra la membrana di lucidatura e la superficie del pezzo, quest'ultima viene modellata con le asperità di forma emisferica, per rispettare una distribuzione statistica. Tale area di contatto risulta poi utile per valutare la quantità di vetro asportato mediante l'utilizzo dell'equazione di Preston [90].

L'influenza del tempo di lucidatura sulla finitura superficiale di componenti ottici è stata studiata con particolare attenzione con riferimento a diversi materiali fragili, non solo per i vetri. Particolarmente interessante è quanto evidenziato da Venkatesh, Zhong e Wihardjo [86], che studiando il comportamento in lucidatura del vetro, dopo lappatura con abrasivi di tipo diverso, hanno messo in luce come l'andamento di  $R_a$  all'aumentare del tempo di lucidatura, presenta un "ginocchio", ovvero dopo un tratto ad elevata pendenza, la curva assume un andamento praticamente asintotico, manifestando un effetto di saturazione (figura 82).

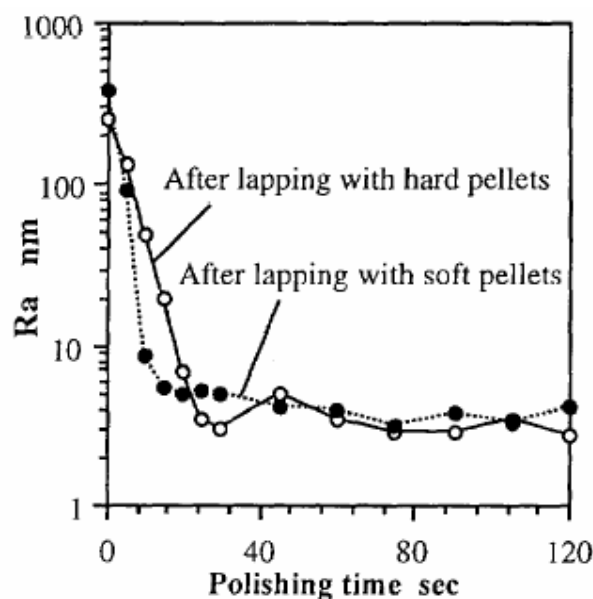


**Figura 81** Schematizzazione delle asperità dell'utensile di lucidatura secondo il modello di Yu.

Dall'osservazione del grafico qui a lato, si deduce come, dopo un rapido miglioramento della finitura della superficie lavorata, nei primissimi istanti di lucidatura, il valore di  $R_a$  raggiunga un minimo, al di sotto del quale la rugosità non riesce a scendere, anche dopo tempi assai elevati di lavorazione. Risulta quindi evidente, come sia inutile attuare tempi di lucidatura superiori rispetto a quello per cui si presenta il "ginocchio", infatti, tempi superiori,

oltre a non portare a miglioramenti nella finitura superficiale del pezzo lavorato, causano l'insorgere di errori di forma.

L'influenza del tipo di abrasivo sulla finitura superficiale di un componente in vetro sottoposto a lucidatura è stata studiata da Ong e Venkatesh [74], che hanno evidenziato come varia l'andamento di Ra al crescere del tempo di lucidatura per diversi tipi di abrasivi usati comunemente in lucidatura, come l'ossido di cerio ( $\text{CeO}_2$ ), il diamante monocristallino e quello policristallino. In figura 83 si nota come, con il diamante monocristallino, siano necessari 4.5 minuti per raggiungere la massima lucidatura, ovvero il minimo valore di Ra che corrisponde al "ginocchio" del paragrafo precedente, mentre utilizzando il diamante policristallino tale tempo scende a 3.5 minuti, ottenendo per di più un valore di rugosità inferiore alla metà di quello raggiunto in precedenza.



**Figura 82** Andamento di Ra in funzione del tempo di lucidatura dopo lappatura con abrasivi soffici e duri.

Un ulteriore dimezzamento del valore minimo di Ra si raggiunge con l'uso dell'ossido di cerio ( $\text{CeO}_2$ ) come abrasivo per la lucidatura, raggiungendo il "ginocchio" in 2 minuti. Tale analisi rende pienamente giustificato l'utilizzo di particelle di ossido di cerio nel liquido abrasivo, come fatto nella quasi totalità delle operazioni di lucidatura del vetro.

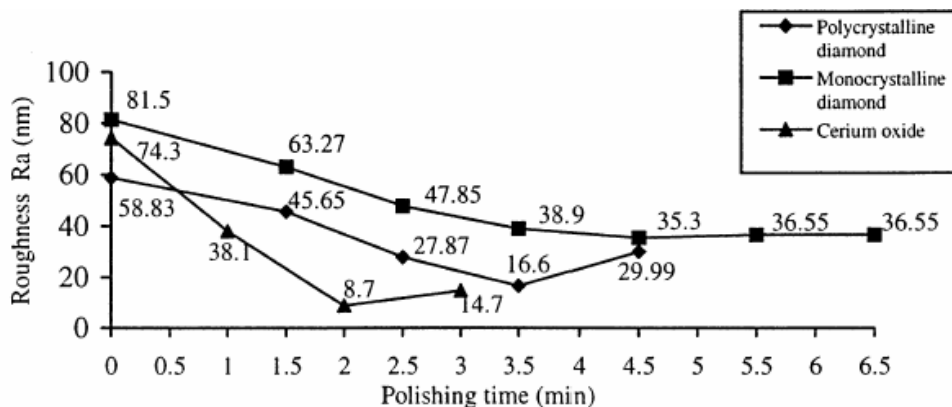


Figura 83 Andamento di Ra in funzione del tempo di lucidatura e del tipo di abrasivo usato.

## V.4.2 Dinamica della lavorazione

### V.4.2.1 SPF 80 CNC

Una volta rettificata la superficie risulta essere opaca ed inoltre presenta delle ondulazioni dovute al particolare moto relativo che si instaura tra utensile e pezzo. Perché la superficie risulti utilizzabile come stampo per lenti deve dunque essere lucidata. Nel caso di stampi convessi si può ricorrere all'utilizzo della lucidatrice SPF 80 CNC.

La macchina in questione è costituita, come accennato nel capitolo precedente, di due alberi che ruotano con velocità angolari differenti: essi sono contenuti su uno stesso piano verticale come illustrato nella figura 45. Sull'albero inferiore è montato lo stampo, mentre sull'albero superiore è attaccato l'utensile. Quest'ultimo oltre a ruotare oscilla nel piano verticale tra un angolo minimo e uno massimo attorno ad un punto che risiede approssimativamente nel centro di curvatura dell'utensile; tale oscillazione causa una leggera flessione del porta lente inferiore che è accoppiato all'albero con un giunto in gomma flessibile favorendo una distribuzione più uniforme delle pressioni.

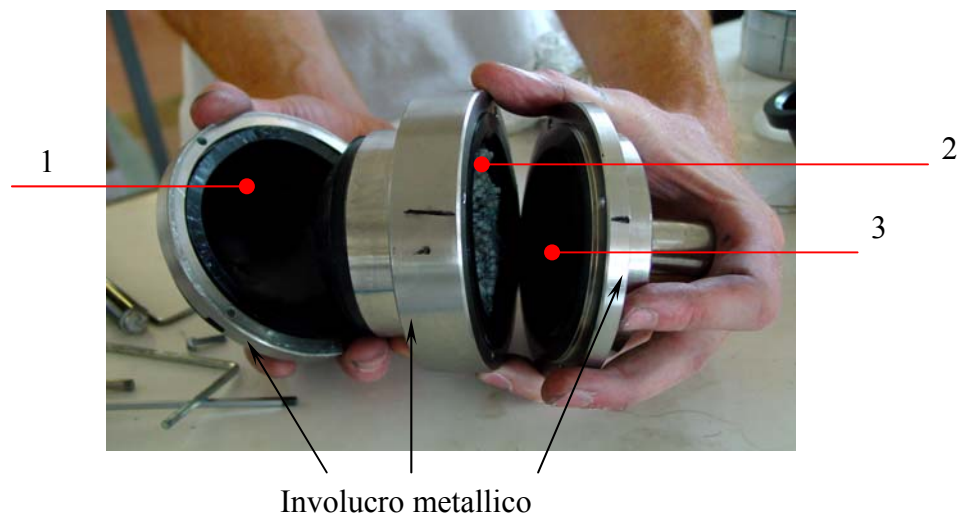
L'oscillazione dell'utensile serve a garantire che non ci siano orientazioni privilegiate delle velocità di strisciamento tra utensile e pezzo (velocità relativa); per tale motivo l'oscillazione ha un andamento particolare: non si ripete una semplice oscillazione tra l'angolo minimo e quello massimo, ma il movimento oscillatorio avviene in un intervallo minore che viene gradualmente traslato come verrà chiarito successivamente.

L'azione abrasiva è un tipico esempio di usura esogena [75], cioè tra tre corpi: il vetro, il poliuretano e tra loro la presenza di una sospensione di ossido di cerio in acqua di determinata densità.

La pressione che viene ad esercitarsi tra l'utensile e lo stampo è determinata dalla pressione impostata in macchina attraverso il parametro pressure nominal bottom e va ad influenzare i tempi di lavorazione.

Un'attenzione particolare merita la descrizione dell'utensile fissato all'albero superiore (rappresentato in figura 84 nelle sue parti). Esso è fondamentalmente un involucro metallico contenente:

- una membrana flessibile sulla quale è ancorato uno strato di poliuretano (1),
- una cuffia cilindrica a base sferica (2) in gomma che a sua volta contiene una serie di cilindri sottili in plastica immersi in lubrificante,
- una membrana cilindrica in gomma (3) che va a ricoprire i cilindri, sulla quale va ad agire una determinata pressione.



**Figura 84 L'utensile di lucidatura con SPF 80 CNC.**

L'utilità della complessa configurazione dell'utensile risiede nel fatto che la superficie dell'utensile di per se non possederebbe in ogni punto la stessa curvatura della lente sottostante, e quindi il contatto avverrebbe in una zona limitata, consentendo così solamente una lucidatura localizzata. Per sopperire a questo inconveniente la membrana 3 viene messa

in pressione; quest'ultima, spingendo i cilindretti, va ad esercitare una pressione sulla cuffia 2 e quindi anche sulla membrana 1 che si adatterà alla superficie dello stampo. Chiaramente un unico utensile non ha una flessibilità tale da adattarsi a qualunque curvatura della lente; per questo motivo i tre elementi dell'utensile sono forniti con diversi raggi di curvatura.

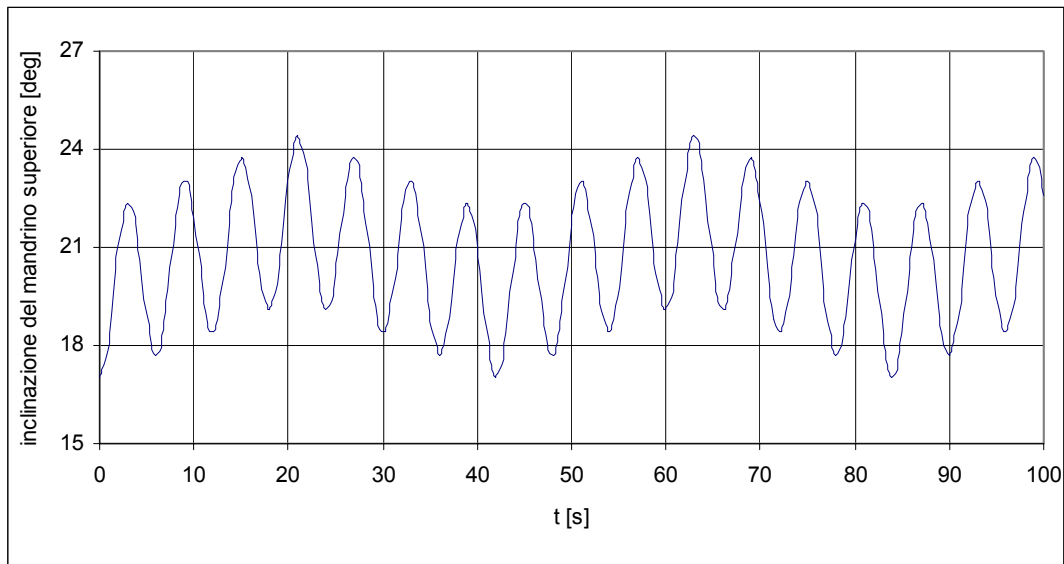
Passiamo ora in rassegna le variabili di input controllabili nel set-up della macchina con l'obiettivo di dare un quadro esaustivo del suo funzionamento; a parte i primi due, gli altri parametri sono impostati nell'interfaccia utente della macchina.

- Densità della sospensione di ossido di cerio in acqua: essa va mantenuta nell'intervallo  $1060 \div 1070 \text{ kg/m}^3$  valore consigliato dalla Optotech.
- Raggio di curvatura della membrana che va scelto tra quelli disponibili in base al raggio di curvatura dello stampo da lucidare tra i quattro disponibili: 130 mm, 80 mm, 70 mm, 60 mm.
- Lens radius: rappresenta il raggio dello stampo; esso viene impostato in macchina solo a titolo di promemoria, ma come vedremo successivamente, può essere utilizzato per determinare l'intervallo di oscillazione.
- Lateral adjustment x axis: è un aggiustamento lungo l'asse x che consente una lieve traslazione tra stampo e utensile; si assume per esso il valore zero consigliato dai tecnici Optotech.
- Distance from vertex to connect surface top, distance from vertex to connect surface bottom: sono due parametri che servono per compensare le differenze dimensionali esistenti tra diversi stampi e diversi utensili; indicano la distanza tra i punti di accoppiamento, rispettivamente dell'utensile e del porta lente con i propri alberi, e il punto di contatto tra stampo e poliuretano.
- Spindle speed top: velocità di rotazione del mandrino superiore.
- Spindle speed bottom: velocità di rotazione del mandrino inferiore.
- Reverse of rotation: tempo dopo il quale si invertono le due velocità di rotazione; nelle lavorazioni eseguite viene posto uguale a zero, il che significa che le velocità di rotazione rimarranno sempre le stesse durante tutta la lavorazione.
- Max angle: angolo massimo dell'oscillazione dell'utensile.



- Min angle: angolo minimo dell'oscillazione dell'utensile.
- Sinus motion: è un numero adimensionale che indica la traslazione dell'oscillazione sopra menzionata.
- Oscill stroke: ampiezza della singola oscillazione.
- Stroke frequency: rappresenta il numero di oscillazioni al minuto.
- Pressure nominal bottom: pressione che spinge la lente sull'utensile.
- Cycle time: tempo di lavorazione.

L'inclinazione assunta dall'albero superiore dipende da cinque parametri: max angle, min angle, sinus motion, oscill stroke e stroke frequency. Impostando per tali parametri rispettivamente  $17^\circ$ ,  $24.5^\circ$ , 0.7,  $5^\circ$ ,  $10 \text{ min}^{-1}$  si ottiene l'andamento riportato nella figura 85.



**Figura 85 Oscillazione del mandrino superiore.**

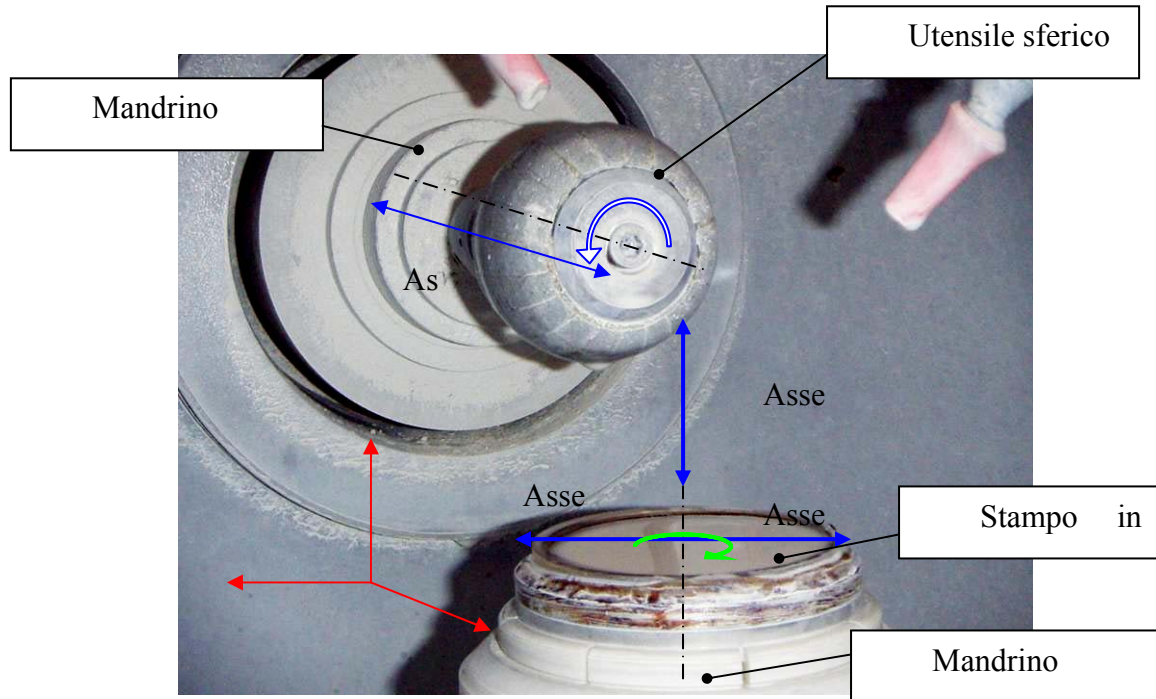
#### **V.4.2.2 ASP 200 CNC**

Come già presento nel capitolo precedente, la lucidatrice ASP 200 CNC, è una macchina a controllo numerico di tipo deterministico a 4 assi (figura 86):

- asse X orizzontale sul mandrino porta-stampo,
- asse Y orizzontale sul mandrino porta-utensile,
- asse Z verticale sul mandrino porta-stampo,

- asse C rotazione del mandrino porta-stampo.

Per le altre caratteristiche tecniche della lucidatrice si rimanda in appendice.



**Figura 86 Schematizzazione della cinematica della lucidatrice.**

Nella lucidatura di stampi in vetro l'asse C rimane bloccato, in quanto, si effettua un percorso utensile e a zig-zag (figura 44). Tale forma di percorso utensile serve a compensare le ondulazioni superficiali che si creano a fine rettifica con ASM 100 CNC, dovute al percorso a spirale. L'utensile si muove in direzione Y con velocità pari alla velocità di avanzamento  $v_{av}$  e ogni qualvolta abbia compiuto una passata sulla lente, la lente trasla in direzione X di un passo  $p_a$ . L'utensile inoltre ruota mantenendo nel punto di contatto una velocità tangenziale di rotazione  $v_{tr}$ . Applicando un'interferenza  $\Delta$  tra l'utensile e la superficie da lavorare, si ottiene un'area di contatto mobile il cui raggio  $R_{ac}$  è dato, secondo la teoria di Hertz [91], dalla:

$$(58) \quad R_{ac} = \sqrt{R_{eq} \cdot \Delta}$$

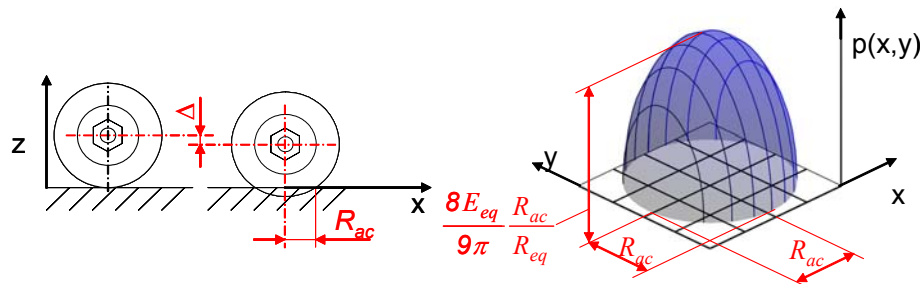
dove  $R_{eq}$  rappresenta il raggio equivalente:

$$(59) \quad R_{eq} = 1 / (1/R_1 + 1/R_2)$$

mentre  $R_1$  e  $R_2$  sono i raggi delle superfici a contatto. Secondo la stessa teoria, la pressione di contatto, dato il modulo di elasticità equivalente  $E_{eq}$ , assume una distribuzione ellissoideale del tipo

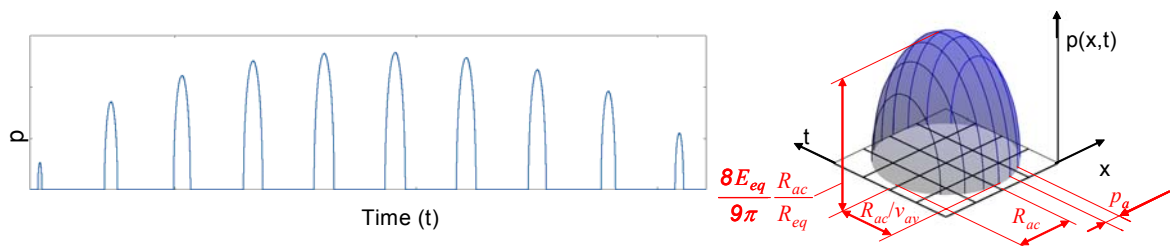
$$(60) \quad p(x,y) = \frac{8 E_{eq}}{9\pi R_{eq}} \sqrt{R_{ac} - (x^2 + y^2)}$$

e può rappresentata come in figura 87.



**Figura 87 Effetto dell'interferenza sull'area e sulla pressione di contatto.**

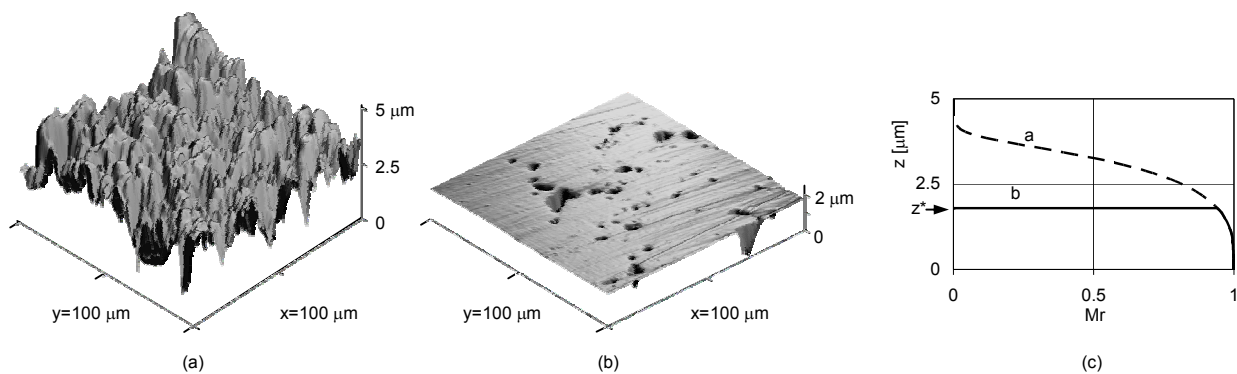
In un punto della superficie l'ellissoide viene visto passare con velocità pari alla velocità di avanzamento dell'utensile  $v_{av}$ . Conseguentemente la pressione che agisce su un punto della superficie, in funzione del tempo, risulta essere descritta dal grafico di figura 88 a sinistra, che è il risultato di un sezionamento a passo costante pari a  $p_a$  del semiellissoide rappresentato in figura 88 a destra. Quest'ultimo atro non è che il semiellissoide di figura 87 al quale è stato sostituito l'asse  $y$  con l'asse  $t$ , e scambiato il raggio nella stessa direzione con il rapporto  $R_{ac}/v_{av}$ . Infatti, il doppio di questo rapporto, è esattamente il tempo necessario perchè il semiellissoide passi sul punto in questione.



**Figura 88 Andamento della pressione di contatto su un punto della superficie in funzione del tempo.**

### V.4.3 Modelli della lavorazione

Nella lavorazione di lucidatura con ASP 200 CNC è possibile notare che una superficie non completamente finita può essere interpretata come una superficie rettificata alla quale siano stati asportati i picchi, come si può notare dalla figura 89 a) e b). La curva di abbott della superficie parzialmente lavorata può allora essere ritenuta uguale a quelle di un profilo rettificato (figura 89 c) curva a) alla quale è stata tolta la parte superiore e sostituita con una retta (figura 89 c) curva b).



**Figura 89 Rappresentazione di una superficie rettificata (a), di una parzialmente lucidata (b) e delle relative curve di abbott (c).**

Si può inoltre dimostrare che il volume di materiale asportato è esattamente l'area compresa tra le curve a e b di figura 89 c).

Secondo la teoria di Reye nei processi di usura, ai quali la lucidatura può essere assimilata, il volume di materiale asportato è proporzionale al lavoro delle forze di attrito; ad una conclusione identica è arrivato Preston analizzando la lucidatura del vetro:

$$(61) \quad V = k \cdot W$$

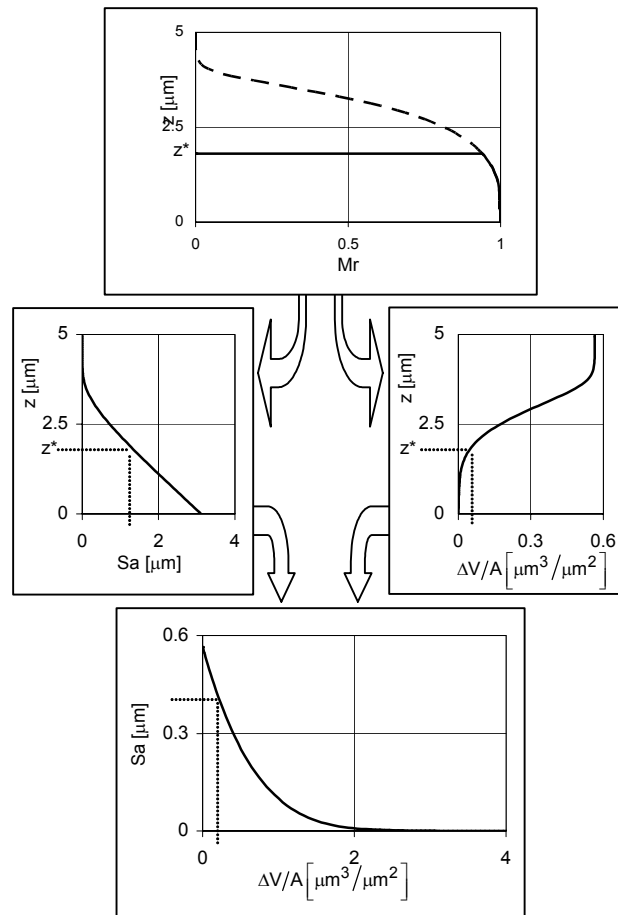
Tale relazione può essere scritta in forma differenziale per unità di area A secondo la:

$$(62) \quad \frac{dV}{A} = k \cdot p \cdot v \cdot dt$$

dove p è la pressione, v la velocità di strisciamento e dt il tempo infinitesimo. Tale relazione può essere integrata in funzione del tempo ottenendo il volume di materiale asportato per unità di area

$$(63) \quad \frac{\Delta V}{A} = \int_0^{\tau} k \cdot p \cdot v \cdot dt$$

Il termine a sinistra della (63) può essere legato attraverso la curva di abbott con i parametri di rugosità della macchina, mentre il termine a destra può essere espresso in funzione dei parametri di lavorazione. Di conseguenza, attraverso la curva di Abbott, è possibile stabilire una correlazione tra i parametri di rugosità e il volume di materiale asportato, che è funzione dei parametri di lavorazione, come schematizzato in figura 90.



**Figura 90 Schematizzazione del modello di lucidatura sviluppato: attraverso la curva di Abbott è possibile passare dal volume di materiale asportato ai parametri di rugosità.**

Infatti, nell'analisi dello stato superficiale 3D, il volume di materiale relativo ad una determinata altezza  $z^*$  è dato dall'area compresa tra la curva di abbott e una retta orizzontale che passa per  $z^*$  (figura 91) e può essere calcolata attraverso la seguente relazione:

$$(64) \quad \frac{\Delta V}{A} = \int_{z_{max}}^{z^*} Mr(z) dz = f(z)$$

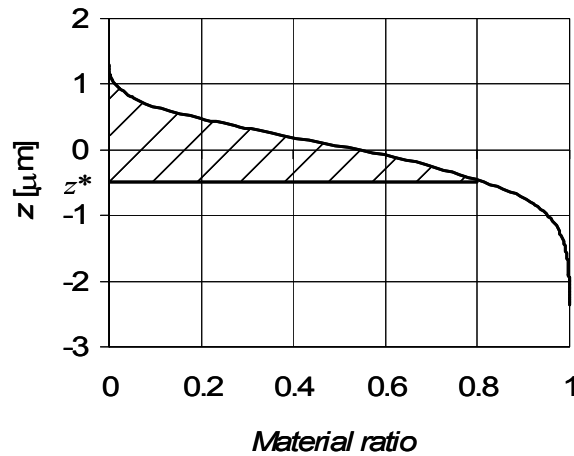
Inoltre i parametri di rugosità di ampiezza della superficie possono essere ricavati dalla curva di Abbott attraverso le seguenti relazioni:

$$(65) \quad Sa = \int_0^1 |z(Mr)| \cdot dMr$$

$$(66) \quad Sq = \sqrt{\int_0^1 z(Mr)^2 \cdot dMr}$$

$$(67) \quad Sv = |MIN(z(Mr))|$$

$$(68) \quad St = MAX(z(Mr)) + |MIN(z(Mr))|$$



**Figura 91** Significato fisico del volume per unità di area, relativo ad una determinata altezza.

Di conseguenza se con un determinato set di parametri di lavorazione è possibile arrivare asportare un determinato volume di materiale, da questo è possibile risalire ad una determinata altezza di lavorazione  $z^*$  e quindi, attraverso la nuova curva di Abbott, ai parametri di rugosità definiti dalle relazioni (65)-(68).

Per ricavare il volume di materiale asportato per unità di area in funzione dei parametri di lavorazione è necessario integrare il secondo termine della (64).

Ritenendo  $k$  indipendente dalla pressione e portando fuori dal segno di integrale la velocità si ottiene:

$$(69) \quad \int_0^{\tau} k \cdot p \cdot v \cdot dt = k \cdot v_{tr} \cdot \int_0^{\tau} p \cdot dt$$

dove  $v_{tr}$  è la velocità tangenziale di rotazione dell'utensile che può essere ritenuta equivalente alla velocità di strisciamento, visto che quest'ultima è pari a

$$(70) \quad v = \sqrt{v_{tr}^2 + v_{av}^2} \approx v_{tr}$$

Per passi di avanzamento sufficientemente piccoli (indispensabili per non lasciare ondulazioni sulla superficie della lente) l'integrale delle pressioni può essere ritenuto pari al volume del semiellissoide di figura 88 diviso per il passo di avanzamento  $p_a$  e ricavato attraverso la seguente relazione:

$$(71) \quad \int_0^{\tau} p \cdot dt = \frac{16 E_{eq}}{27 v_{av}} \sqrt{R_{eq}} \frac{\Delta^{1.5}}{p_a}.$$

Questo può essere spiegato pensando di avere un raggio grande e un passo unitario: in questo caso l'integrale è esattamente pari al volume del semiellissoide per la definizione stessa di integrale. Se si pensa che il passo sia pari a 1/2 allora si ottiene che l'integrale di  $p$  in  $dt$  è esattamente 2 volte il volume, in quanto il numero di "fette" con cui si divide l'ellissoide è esattamente il doppio e quindi le aree risultano raddoppiate. Analogamente se il passo sia 1/3 si ottiene che l'integrale della pressione è esattamente pari a 3 volte il semivolume dell'ellissoide. Generalizzando si può quindi affermare che l'integrale di  $pdt$  è esattamente il semivolume dell'ellissoide diviso per  $p_a$ . Allo stesso risultato si giunge integrando numericamente la distribuzione delle pressioni riportata sul grafico di figura 88 a destra.

Il secondo termine dell'integrale risulta dunque uguale a:

$$(72) \quad \int_0^{\tau} k \cdot p \cdot v \cdot dt = k \frac{16 v_{tr}}{27 v_{av}} E_{eq} \sqrt{R_{eq}} \frac{\Delta^{1.5}}{p_a}.$$

È dunque possibile correlare i parametri di rugosità di ampiezza 3D con i parametri del ciclo di lavorazione:

$$(73) \quad Sa = f \left( k \frac{16 v_{tr}}{27 v_{av}} E_{eq} \sqrt{R_{eq}} \frac{\Delta^{1.5}}{p_a} \right).$$

L'influenza dei materiali dell'utensile, del materiale lavorato e del materiale lubrificante che svolge un'azione meccanico-chimica, non è stata studiata in modo approfondito in quanto tali condizioni rimangono costanti durante il processo e la loro azione viene conglobata nella costante  $k$ , in letteratura chiamata costante di Preston.

La valutazione del modulo di elasticità equivalente  $E_{eq}$  è stata fatta attraverso una prova di sforzo deformazione. Applicando la teoria di Hertz, si ottiene che il modulo di elasticità equivalente risulta proporzionale al coefficiente angolare  $m$  della retta di interpolazione della curva sforzo deformazione elevata alla 1.5, secondo la seguente relazione:

$$(74) \quad E_{eq} = \frac{3}{4} \frac{1}{R_{eq}^{0.5}} \frac{F}{\Delta^{1.5}} = \frac{3}{4} \frac{m}{R_{eq}^{0.5}}.$$

Per il calcolo della costante  $k$  si è partito dalle misure di rugosità 3D dei campioni rettificati e dei campioni parzialmente lucidati. Dalle misure dei primi sono state estratte le curve di Abbott, mentre sui secondi sono stati valutati i valori di rugosità. Attraverso la schematizzazione fatta in figura 90 è possibile ottenere una correlazione tra il volume di materiale asportato e i valori di rugosità risultanti. Noto la quantità di materiale asportato e i parametri del ciclo di lavorazione è possibile stimare  $k$  mediante la seguente relazione:

$$(75) \quad k = \frac{\frac{\Delta V}{A}}{\frac{16 v_{tr}}{27 v_{av}} E_{eq} \sqrt{R_{eq}} \frac{\Delta^{1.5}}{p_a}}.$$

Si è ritenuto opportuno passare attraverso i parametri di rugosità in quanto questi garantiscono una valutazione statistica dello stato superficiale, che, soprattutto per i parametri di altezza media, garantiscono una maggiore stabilità dei risultati.

#### V.4.4 Valutazioni sperimentali

##### V.4.4.1 Pianificazione sperimentale per la lucidatrice SPF 80 CNC

Per indagare l'effetto dei parametri di lavorazione sullo stato superficiale sono stati lucidati i provini D1 e E1 ottenuti in rettifica, che presentano geometria concava asferica. In



tabella 6 e tabella 7 sono riportati tutti i provini realizzati e i relativi parametri di lavorazione impiegati per le valutazioni sperimentali.

Attraverso i provini D1.1-D1.4 e E1.1-E1.9 si è valutato come evolve la rugosità superficiale in funzione del tempo di lucidatura, eseguendo le misure in direzione radiale a diverse distanze dal centro dello stampo. In questo contesto non si è ritenuto utile studiare i parametri di ondulazione e del profilo primario visto che la lavorazione implica l'eliminazione della componente legata al passo spirale di rettifica.

I campioni della serie E1 sono stati inoltre rilevati con profilometro al fine di valutare l'evoluzione della curvatura in funzione del tempo di lucidatura. Tale analisi è stata eseguita con gli strumenti descritti nel capitolo III.

Lente	D1	E1
Densità della sospensione [kg/m <sup>3</sup> ]	1065	1062
Raggio di curvatura utensile [mm]	130	60
Diametro stampo [mm]	75	70
Lens radius [mm]	132.450	57.510
Lateral adjust. X axis [mm]	0	0
Distance from the vertex ...top [mm]	92	92
Distance from the vertex ...bottom [mm]	78	83
Spindle speed top [rpm]	400	400
Spindle speed bottom [rpm]	350	350
Reversal of rotation	0	0
Max angle [°]	15	24.5
Min angle [°]	10	17
Sinus motion	0.7	0.7
Oscill stroke	5	5
Stroke frequency	10	10
Pressure nominal bottom [bar]	0.7	0.7

**Tabella 6 Parametri macchina impiegati nella lucidatura degli stampi.**

Lente	D1.1	D1.2	D1.3	D1.4					
cycle time [s]	250	400	630	1000					
Lente	E1.1	E1.2	E1.3	E1.4	E1.5	E1.6	E1.7	E1.8	E1.9
cycle time [s]	100	160	250	315	400	500	630	800	1000

**Tabella 7 Tempi di lavorazione utilizzati nella lucidatura con SPF 80 CNC di stampi in vetro.**

Gli strumenti di misura impiegati nelle valutazioni dello stato superficiale in lucidatura sono il profilometro-rugosimetro SURFCOM 1800D e il microscopio a forze atomiche AFM

EXPLORER TOPOMETRIX<sup>TM</sup>; per informazioni dettagliate sugli strumenti di misura si rimanda all'appendice.

I parametri di rugosità indagati sono gli stessi che sono stati impiegati in rettifica, impiegando come lunghezza di base 0.25 mm, ai quali, sono stati aggiunti, per i campioni E1, i parametri Sa, Sp, Sv, Sz e Sq relativi alla rugosità 3D definiti nella ISO/DIS 25178-2 [93].

#### ***V.4.4.2 Pianificazione sperimentale per la lucidatrice ASP 200 CNC***

Per indagare l'effetto dei parametri di lavorazione sullo stato superficiale sono stati lucidati i provini della serie M8 e M9 ottenuti in rettifica, che presentano geometria piana e i provini S9 di geometria sferica. In tabella 8 sono riportati tutti i provini realizzati e i relativi parametri di lavorazione impiegati per le valutazioni sperimentali.

Campioni	$p_a$	Tempo	Vel. Rot. Utensile	$V_{av}$	$\Delta$
M8.1	0.3 mm	63 s	1005 rpm	4000 mm/min	0.8 mm
M8.2	0.3 mm	100 s	1005 rpm	4000 mm/min	0.8 mm
M8.3	0.3 mm	160 s	1005 rpm	2104.5 mm/min	0.8 mm
M8.4	0.3 mm	250 s	1005 rpm	1052.3 mm/min	0.8 mm
M8.5	0.3 mm	400 s	1005 rpm	701.5 mm/min	0.8 mm
M8.6	0.3 mm	630 s	1005 rpm	420.9 mm/min	0.8 mm
M9.1	0.5 mm	120 s	1000 rpm	1326 mm/min	0.5 mm
M9.2	0.3 mm	150 s	1000 rpm	2109 mm/min	0.5 mm
M9.3	0.3 mm	200 s	1000 rpm	1406 mm/min	0.5 mm
M9.4	0.3 mm	250 s	1000 rpm	1054 mm/min	0.5 mm
M9.5	0.3 mm	350 s	1000 rpm	843 mm/min	0.5 mm
M9.6	0.3 mm	500 s	1000 rpm	527 mm/min	0.5 mm
S9.1	0.3 mm	180 s	1000 rpm	2244 mm/min	0.5 mm
S9.2	0.3 mm	250 s	1000 rpm	1683 mm/min	0.5 mm
S9.3	0.3 mm	400 s	1000 rpm	1122 mm/min	0.5 mm

**Tabella 8 Parametri impiegati per la lucidatura con ASP 200 CNC.**

Oltre alla valutazione dei parametri di rugosità in funzione dei parametri di lavorazione, con i campioni che presentano rugosità più elevata è stato possibile valutare il modello che correla la rugosità superficiale con i parametri di lavorazione, proposto nel paragrafo V.4.3 .

Gli strumenti di misura impiegati nelle valutazioni dello stato superficiale in lucidatura sono il profilometro-rugosimetro SURFCOM 1800D e il microscopio a forze atomiche AFM EXPLORER TOPOMETRIX™; per informazioni dettagliate sugli strumenti di misura si rimanda all'appendice.

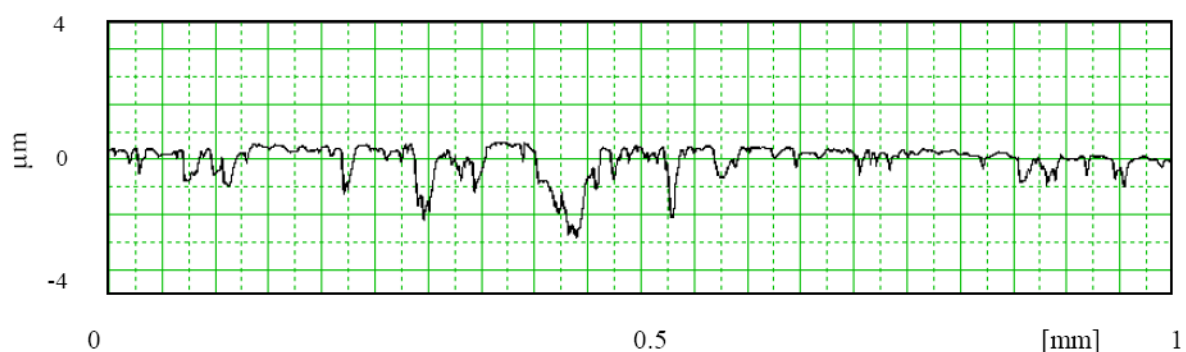
I parametri di rugosità indagati sono gli stessi che sono stati impiegati in rettifica, impiegando come lunghezza di base 0.25 mm, ai quali, sono stati aggiunti, per i campioni E1, i parametri Sa, Sp, Sv, Sz e Sq relativi alla rugosità 3D definiti nella ISO/DIS 25178-2 [93].

Attualmente si sta inoltre mettendo a punto un modello che correli la profondità di passata in funzione dei parametri di lavorazione.

#### ***V.4.4.3 Analisi dei risultati sperimentali per la lucidatrice SPF 80 CNC***

Le analisi di rugosità eseguite sugli stampi durante la lavorazione di lucidatura sono state valutate su una lunghezza di misura pari a 1.25 mm con lunghezza di base pari a 0.25 mm.

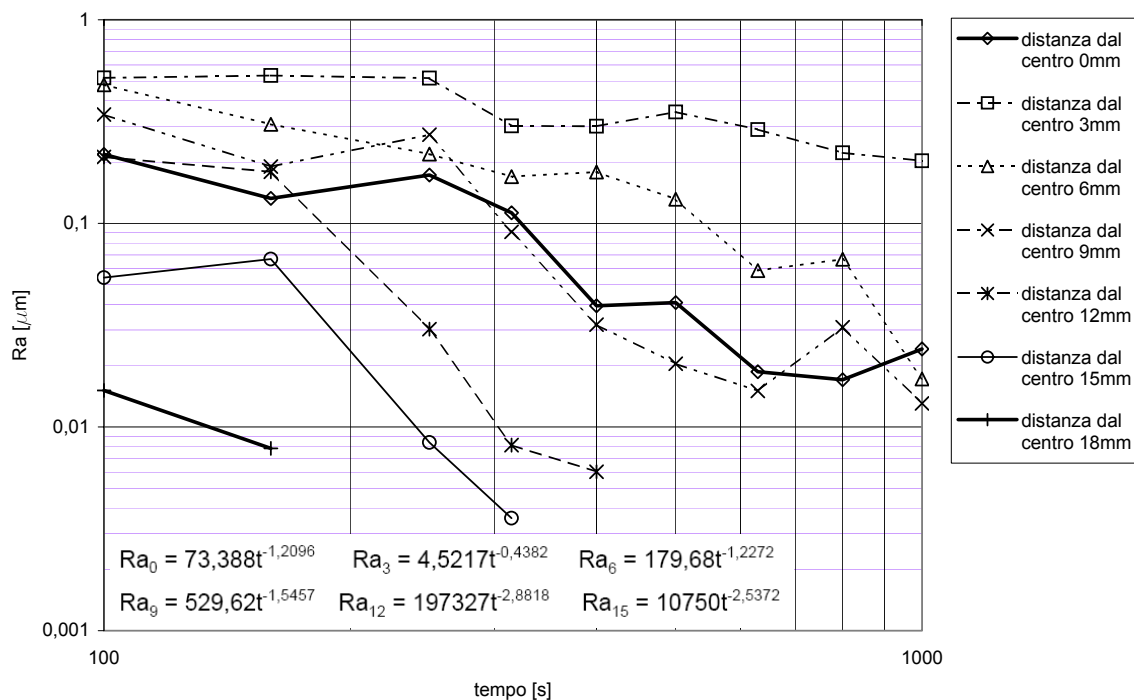
Attraverso il rugosimetro non è possibile misurare la rugosità superficiale di un profilo completamente lucidato, in quanto essa risulta coperta dal rumore di fondo dello strumento. Si può comunque ritenere che la lucidatura sia completata quando con il rugosimetro si rileva esclusivamente rumore; inoltre per valutazioni più precise è possibile ricorrere all'uso dell'AFM. In figura 92 si riporta a titolo esemplificativo il profilo primario di una lente parzialmente lucidata.



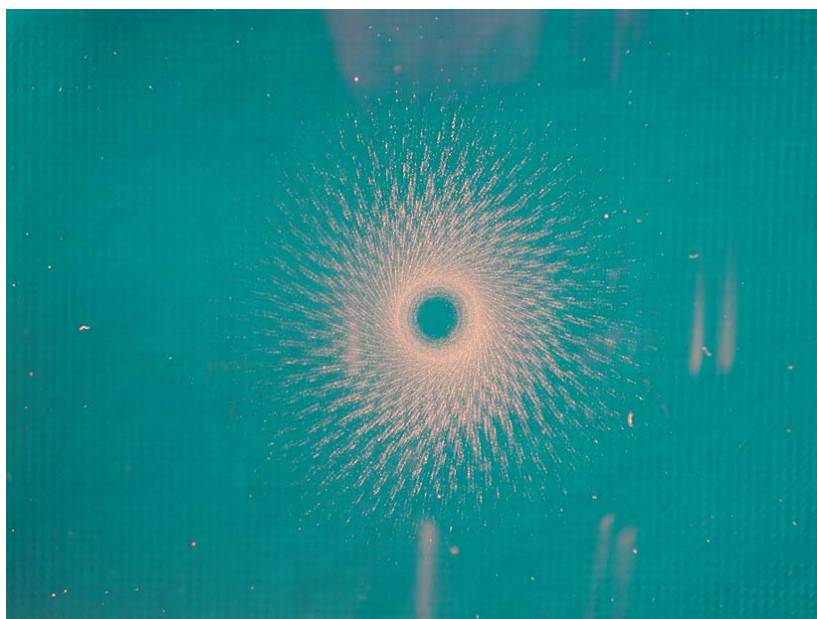
**Figura 92 Profilo primario di una lente parzialmente lucidata.**

Analizzando il comportamento del parametro di rugosità superficiale Ra in funzione del tempo, per diverse distanze dal centro (figura 93), si può notare che essa è rappresentata

abbastanza bene da una relazione tipo  $Ra = a \cdot t^b$  in corrispondenza di diverse distanze dal centro. Se la tendenza delle misure conduce a valori di Ra di qualche nanometro in tempi inferiori a 1000s si può dire che in corrispondenza a quella distanza dal centro si è giunti al completamento della fase di lucidatura. Nel nostro caso si può notare che per una distanza dal centro pari a 3 mm si è molto lontani dall'ottenere la superficie lucidata; questo fatto è legato in particolare alla presenza di una deformazione dell'utensile di rettifica dovuta all'usura. A 6 mm si può ipotizzare di giungere a lucidatura aumentando il tempo di lucidatura di un ordine di grandezza (la cosa non è di utilità pratica perché un tempo di lavorazione così elevato non è proponibile). Escludendo le zone intorno al centro (curve di rugosità rilevate a 3 mm e 6 mm dal centro che presentano problematiche legate all'usura dell'utensile e che non si riescono a lucidare come mostrato in figura 94), le differenze nella velocità di asportazione di materiale, e quindi nell'evoluzione della rugosità, possono essere legate alla diversa velocità relativa media al variare della distanza dal centro dello stampo.



**Figura 93 Andamento di Ra in funzione del tempo di lucidatura per differenti distanze dal centro dello stampo.**



**Figura 94 Mancata lucidatura della zona intorno al centro dello stampo, legata all'usura dell'utensile di rettifica.**

In figura 95 viene riportato l'andamento del parametro  $R_a$  in funzione della distanza dal centro per diversi tempi di lavorazione; anche in questo caso si può notare che per distanze dal centro maggiori si ha una più rapida variazione del parametro di rugosità.

Andamenti analoghi si sono rilevati per il parametro  $R_z$  (figura 96).

Alle stesse conclusioni si giunge analizzando il parametro  $R_{sk}$  (figura 97); in questo caso si è riportato anche un valore medio di  $R_{sk}$  per  $t=0$ , cioè ottenuto dalle misure di rettifica; si può notare che l'asimmetria del profilo tende in un primo momento ad assumere valori sempre più negativi, a causa della formazione di una parte piana lucidata, con la presenza di alcuni avvallamenti; quindi il parametro tende ad aumentare per avvicinarsi a 0, mano a mano che spariscono le valli lasciate dalla rettifica.

L'evoluzione di  $R_a$  all'aumentare del tempo di lucidatura degli stampi concavi della serie E1, risulta fortemente influenzata, specialmente nel tratto asintotico della curva, dal valore del rumore di fondo rilevato dal rugosimetro, essendo questo dello stesso ordine di grandezza del parametro di rugosità. Si è quindi deciso, di effettuare un'analisi analoga utilizzando un microscopio a forza atomica, per sfruttare la migliore risoluzione di tale strumento, al fine di poter misurare più efficacemente le superfici lucidate più a lungo. In figura 98 vengono riportate le immagini di tre scansioni eseguite con AFM eseguite a circa 15 mm dal centro per

tempi di lucidatura rispettivamente di 100 s, 315 s e 400 s. L'andamento del parametro Sa rilevato nella stessa zona è riportato in figura 99

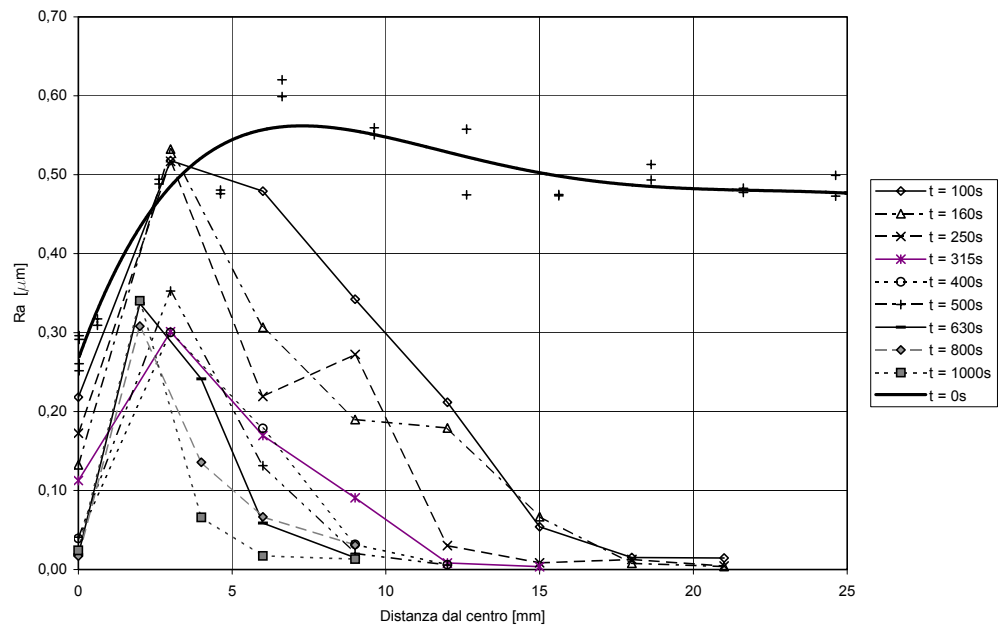


Figura 95 Andamento di Ra in funzione della distanza dal centro dello stampo, per differenti tempi di lucidatura.

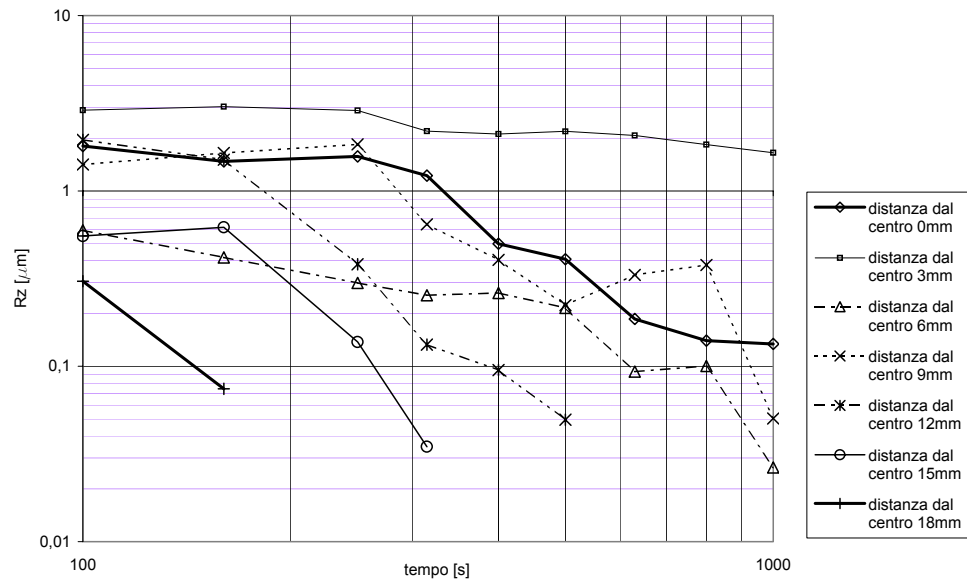
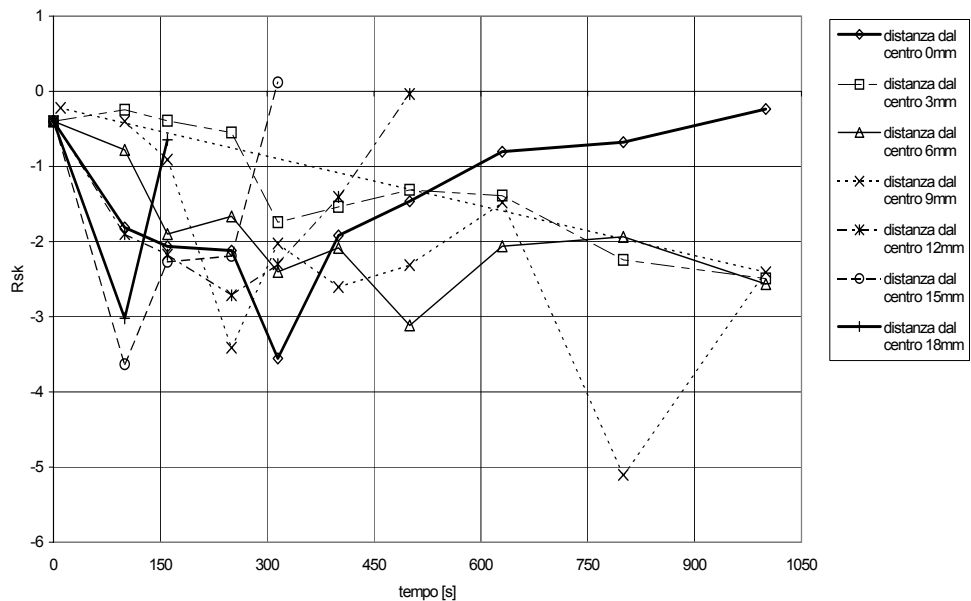
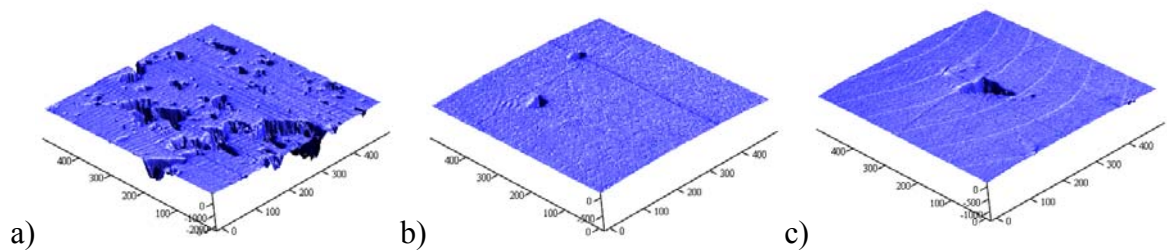


Figura 96 Andamento di Rz in funzione del tempo di lucidatura per differenti distanze dal centro dello stampo.



**Figura 97 Andamento di Rsk in funzione del tempo di lucidatura per differenti distanze dal centro dello stampo.**

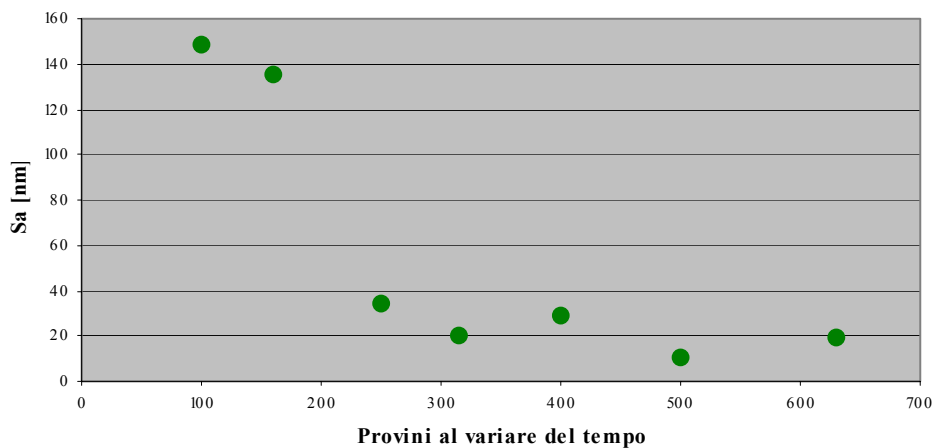


**Figura 98 Immagine all'AFM della superficie del provino E1.1 (a), E1.4 (b), E1.5 (c), con lato 150  $\mu\text{m}$ .**

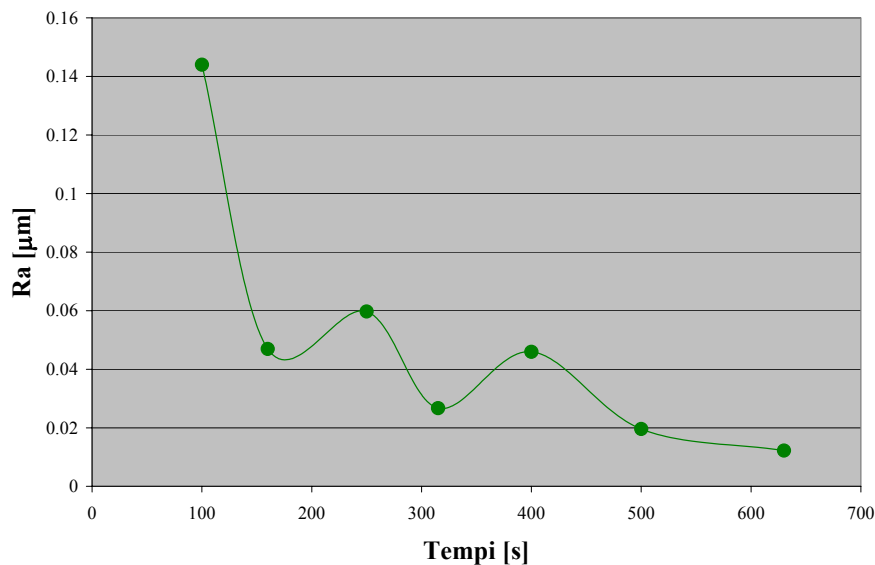
Per poter comparare i risultati ottenuti con profilometro, con quelli rilevati con AFM, si sono indagate alcune righe della scansione; in particolare si sono studiati i parametri di rugosità del profilo su righe di scansione che presentano difetti evidenti (figura 100) e su righe di scansione che presentano l'assenza di tali difetti (figura 101). In questo modo si è potuto superare il limite delle misure di rugosità effettuate con il rugosimetro individuando valori di rugosità di una lente lucidata che si aggirano attorno al nm di Ra.

Dalle analisi con profilometro eseguite, è stato possibile notare che l'errore legato all'usura dell'utensile in rettifica, non può essere corretto nella lucidatura. Questo risulta particolarmente evidente osservando i grafici di figura 102 e figura 103 che riportano la curvatura dei campioni analizzati e la differenza della stessa rispetto al valore nominale. In

essi si può notare che l'errore di curvatura al centro dello stampo, pur riducendosi all'aumentare del tempo di lucidatura, non può essere eliminato (e comunque nella medesima zona la lucidatura non riesce a portare la rugosità superficiale a valori sufficientemente bassi); per contro si può notare che la lucidatura per tempi elevati, induce un errore in curvatura verso il bordo dello stampo che può essere legato ad una maggiore velocità relativa tra il pezzo e utensile, nonché ad una maggiore rigidità del bordo dell'utensile.

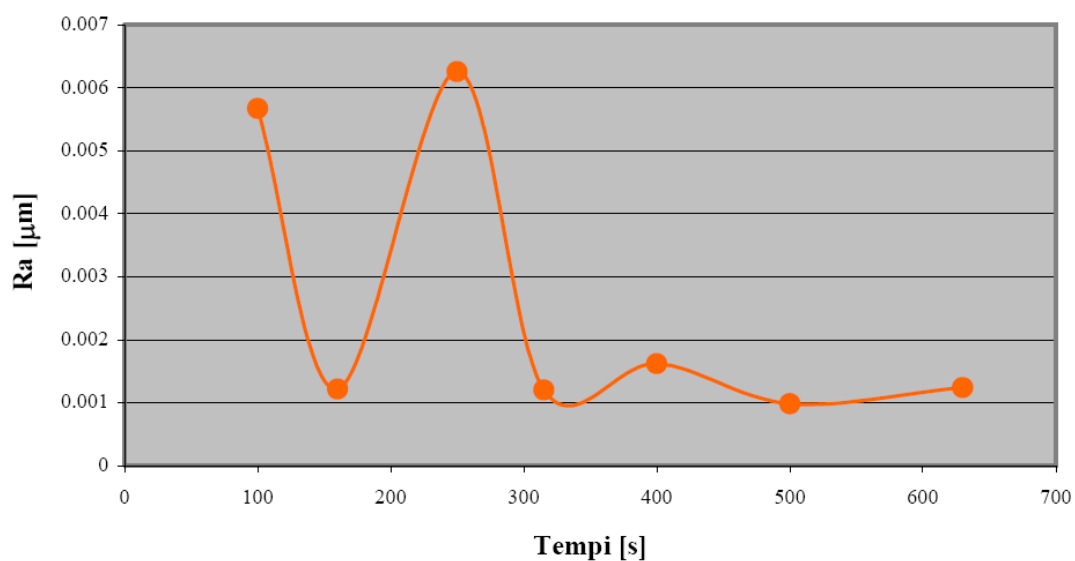


**Figura 99** Evoluzione del parametro di tessitura superficiale Sa all'aumentare del tempo di lucidatura.

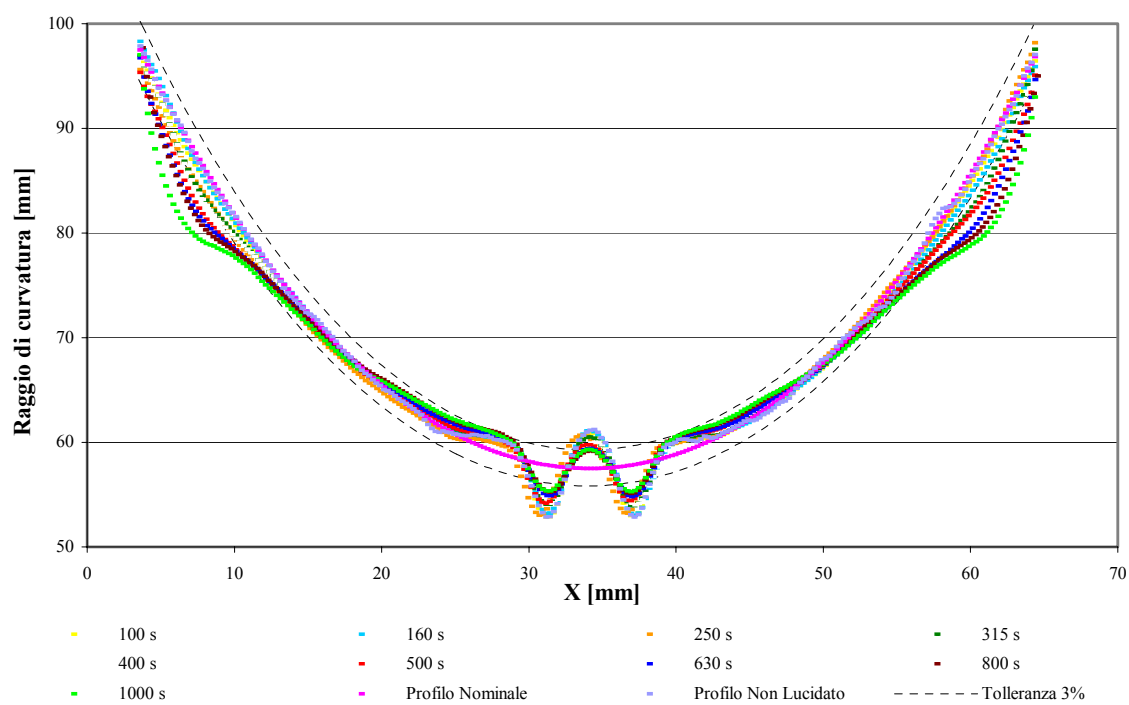


**Figura 100** Andamento di Ra al variare del tempo di lucidatura, su righe (da scansione AFM) con difetti evidenti.

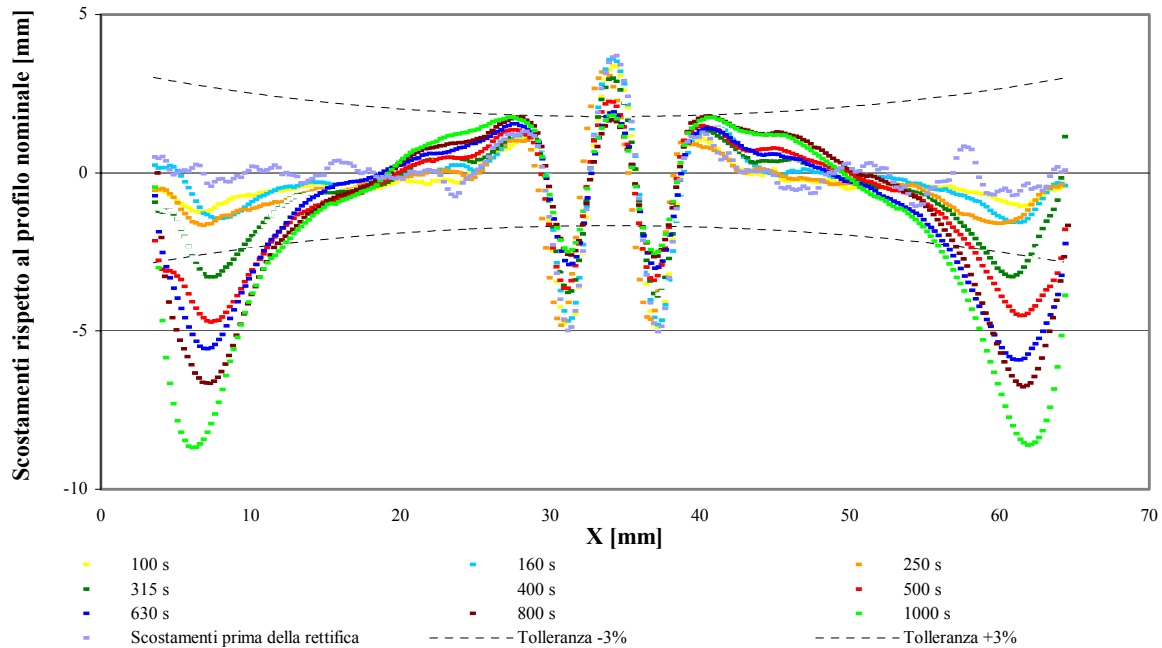




**Figura 101 Andamento di Ra al variare del tempo di lucidatura, su righe (da scansione AFM) senza difetti evidenti.**



**Figura 102 Andamento della curvatura in funzione del tempo di lavorazione.**



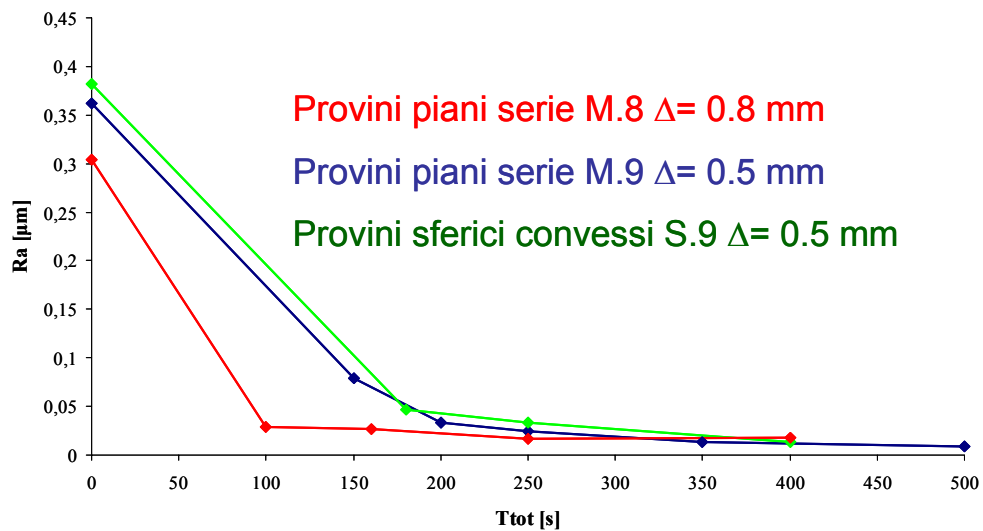
**Figura 103 Differenza tra curvatura misurata e curvatura nominale, con evidenziate zone di tolleranza pari al 3% della curvatura nominale.**

#### ***V.4.4.4 Analisi dei risultati sperimentali per la lucidatrice ASP 200 CNC***

Come si può desumere da quanto detto nella descrizione della macchina il tempo di lavorazione è definito dal passo e dalla velocità di avanzamento. Per riassumere l'influenza di tali parametri, considerando che le dimensioni radiali dei campioni da lavorare sono identiche, è quindi possibile esprimere i parametri di rugosità in funzione del tempo totale di lavorazione.

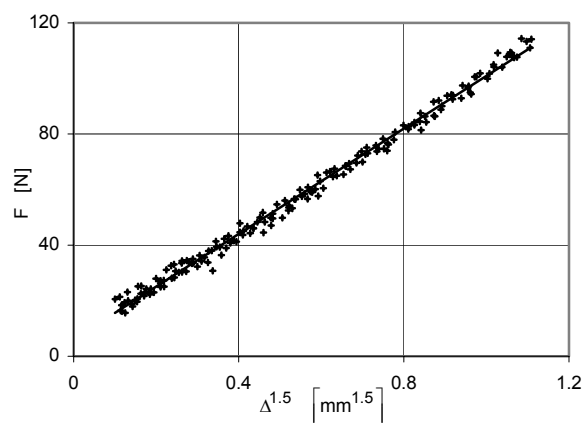
In figura 104 sono riportati i valori medi del parametro  $R_a$  in funzione del tempo di lavorazione per i campioni indagati; in particolare è possibile notare che i provini M8, ottenuti con un'interferenza maggiore presentano un più veloce decadimento dei parametri di rugosità rispetto alla serie M9, infatti, l'inclinazione della curva che rappresenta la rugosità in funzione del tempo risulta maggiore per la serie M8. Al contrario la serie S9 presenta, a parità di interferenza, un decadimento dei parametri di rugosità inferiore rispetto alla serie M9, legato al fatto che la superficie da lavorare nel caso di provini sferici, a parità di diametro dei campioni, risulta maggiore rispetto ai provini piani.

I valori limite del parametro di rugosità Ra si aggirano intorno ai 20 nm, notevolmente superiori a quelli che si ottengono con la lucidatrice SPF 80 CNC. Inoltre è possibile notare che già a 200 secondi di lavorazione i valori assunti dal parametro Ra si aggirano intorno ai 30 nm.



**Figura 104** Evoluzione nel tempo di Ra nel corso della lucidatura con Optotech ASM 200 CNC.

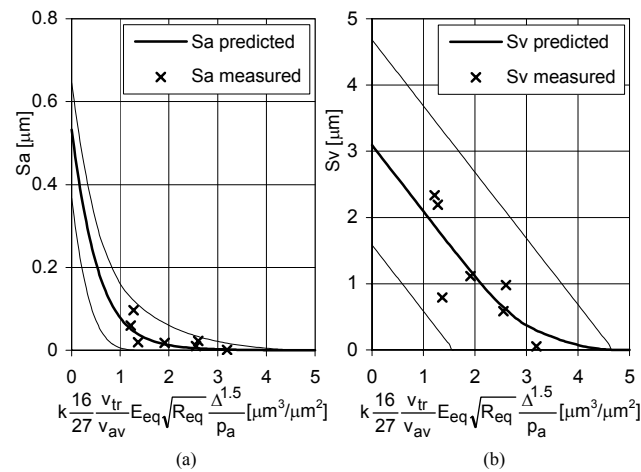
Per quanto riguarda la validazione del modello proposto al paragrafo V.4.3 , si è dapprima proceduto al calcolo del modulo di elasticità equivalente con una prova sforzo deformazione figura 105, che ha fornito un valore del medesimo, attraverso la (74), pari a  $E_{eq} = 12$  MPa.



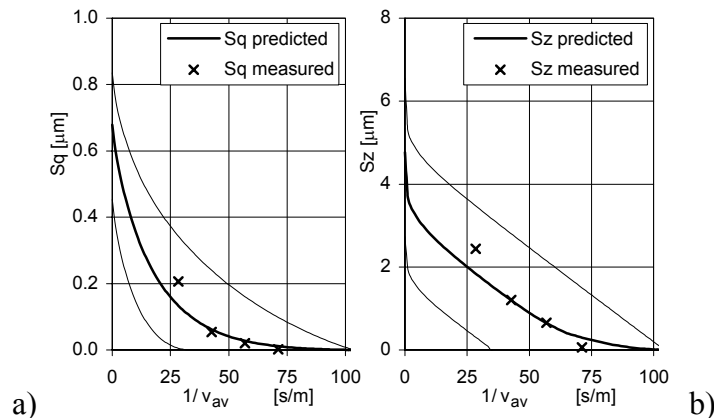
**Figura 105** Curva sforzo-deformazione dell'utensile di lucidatura per il calcolo del modulo di elasticità equivalente.

Quindi, attraverso i campioni piani M8e M9, impiegando la procedura descritta al paragrafo V.4.3 , e grazie alla relazione (75), si è ottenuto un valore della costante del modello  $k_s$  pari a  $2.47 \cdot 10^{-13} \text{ Pa}^{-1}$ .

Le curve teoriche, costruite partendo da provini rettificati che presentano diversi valori di rugosità, e quindi diverse curve di Abbott, dimostrano descrivere in maniera ottimale l'andamento dei parametri di rugosità in funzione dei parametri di lavorazione (figura 106), in particolare per quel che riguarda l'andamento dei parametri di rugosità in funzione della velocità di avanzamento (figura 107).



**Figura 106 Valori dei parametri di rugosità  $Sa$  (a) e  $Sq$  (b) in funzione dei parametri di lavorazione.**



**Figura 107 Andamento teorico ed effettivo dei parametri di rugosità  $Sq$  (a) e  $Sz$  (b) in funzione della velocità di avanzamento dell'utensile.**

Attualmente è inoltre in corso una campagna sperimentale per la valutazione della profondità di passata in funzione dei parametri di lucidatura, alla fine della quale ci si aspetta

di ottenere una completa correlazione tra errori micro e macrogeometrici che nascono da parametri di lavorazione.

### ***V.5 Linee guida per la scelta dei parametri di lavorazione***

Per quel che riguarda la fase di sgrossatura, i parametri impostati non sono rilevanti in quanto con essa si vuole esclusivamente conferire allo sbizzo una forma prossima a quella finale. Si consiglia pertanto di tenere alte le impostazioni della velocità (tangenziale e angolare massima) del mandrino porta pezzo in modo da ridurre i tempi di questa prima fase, eventualmente ottimizzando gli aspetti di durata dell'utensile. In questa fase della lavorazione si deve porre l'attenzione principalmente all'impostazione del center thickness in modo tale che la mola di sgrossatura non debba asportare un eccessivo spessore di materiale (è bene valutare anche che la geometria dello sbizzo non sia troppo lontana da quella che si vuole ottenere; in caso contrario si consiglia di eseguire più passate). Inoltre va ricordato che si deve lasciare contour offset che garantisca una profondità di passata in finitura sufficiente ad eliminare le impronte della sgrossatura.

Nella fase di finitura si è rilevato che la velocità di rotazione dell'utensile non ha influenze percepibili sulla finitura superficiale; si consiglia comunque di utilizzare 8000 rpm. Per quel che riguarda la velocità tangenziale nella zona di lavoro si consiglia di utilizzare 4 m/min; tale valore non va impostato in macchina, ma va convertito con la relazione (53) (le impostazioni effettuate in macchina non sono riferite alla zona di lavoro, bensì al centro dell'utensile). Per la massima velocità angolare si consigliano 300 rpm (anche in questo caso si può fare un ragionamento simile al precedente in modo che la limitazione sulla velocità tangenziale intervenga sempre alla stessa distanza dal centro, per esempio 10 mm).

Per garantire una precisione superiore è consigliabile effettuare più passate di finitura; a questo proposito si sta sviluppando un modello che consente di stabilire anticipatamente l'errore macrogeometrico commesso in funzione dei parametri di lavorazione.

Per quanto riguarda il passo spirale i valori che si consigliano di impiegare sono compresi tra 0.3 e 0.7 mm a seconda della curvatura della superficie; in ogni caso a seconda

che le lenti siano concave o convesse si possono impiegare le relazioni (55) e (56) in modo da mantenere un valore del parametro di ondulazione  $W_z$  inferiore a un micrometro.

La dimensione della grana della mola è sicuramente il parametro che più influenza la rugosità superficiale ottenuta; in questo caso risulta utile mantenere tale parametro il più piccolo possibile in modo da ridurre i tempi della successiva fase di lucidatura.

Particolare attenzione va prestata all'usura degli utensili: si consiglia di effettuare un dressing di forma delle mole ogni 16 ore di lavoro; tale operazione, oltre a conferire all'utensile la forma sferica originaria, consente di ravvivare l'utensile portando in superficie un maggior numero di grani abrasivi.

Nelle fasi di lucidatura si consiglia di impiegare prima la lucidatrice ASP 200 CNC per abbattere le rotture fragili legate alla rettifica, e successivamente ricorrere alla lucidatura con SPF 80 CNC per eliminare i difetti residui legati al passo di avanzamento e alla superiore rugosità superficiale che la prima lucidatrice lascia. In ogni caso per entrambe le lavorazioni si consiglia di giungere ad un compromesso tra il ginocchio della curva di rugosità tipico dei problemi di lucidatura e il volume di materiale asportato per unità di area.

Nella lucidatura con ASP 200 CNC si può ritenere ottimale l'impiego di una interferenza tra utensile e stampo pari a 0.8 mm; in questo modo si può raggiungere il ginocchio della curva di rugosità con un tempo di lavorazione pari a 100 s su modelli di diametro 40 mm. Utilizzando quindi un passo di avanzamento pari a 0.2 mm si consiglia di impiegare una velocità di avanzamento dell'utensile pari a 3500 mm/min.

Anche in questo caso è in fase di validazione un modello che consente di correlare il volume di materiale asportato per unità di area (inteso in questo caso come altezza asportata) in funzione dei parametri di lavorazione.

Con una passata di lucidatura con SPF 80 CNC di 100 s si dovrebbe successivamente giungere alla lucidatura completa dello stampo. Tale tempo è stato calcolato ipotizzando una legge esponenziale di decadimento della rugosità superficiale, considerando il processo concluso, dopo che sia passato 3 volte il tempo pari all'esponente (costante di tempo). In questo modo si evita di giungere ad errori geometrici troppo elevati al bordo, che porterebbero a scartare lo stampo. In questo caso si consiglia di impiegare una pressione di lavoro pari a 0.9 bar.

## **Capitolo VI**

### **Prototipazione e analisi di modelli fisici**

La verifica ultima che si va a fare per valutare la bontà del progetto sviluppato è senza ombra di dubbio l'analisi dei prototipi. In questo caso andremo a valutare se gli strumenti sviluppati per la progettazione di lenti progressive consentono di ottenere lenti che rispecchiano le specifiche ottiche nominali richieste.

Attraverso lo strumento di progettazione descritto nel capitolo II sono stati sviluppati una serie di 5 design differenti, dei quali alcuni sono stati prototipati ed uno è stato oggetto di brevettazione.

La corrispondenza delle proprietà ottiche misurate sui prototipi realizzati, con le specifiche progettuali, entro i limiti consentiti dalla normativa, ha dimostrato la validità dello strumento di progettazione sviluppato.

## ***VI.1 Lenti semifinite e lenti finite non tagliate***

Tecnicamente, quando si parla di lenti semifinite [101] ci si riferisce a lenti, prodotte con tecniche di casting, injection molding o asportazione di truciolo, lavorate su una sola superficie, che devono essere successivamente riprese su specifica in un laboratorio ottico di prescrizione, le cui specifiche sono definite nella normativa UNI EN ISO 10322 per lenti monofocali o multifocali [99] e per lenti progressive [100].

Una lente lavorata finita su entrambe le superfici, viene detta lente finita non tagliata, e sui requisiti fondamentali sono descritti nella UNI EN ISO 14889 [102]. Accanto a questa normativa, sempre per le lenti finite non tagliate, vanno ricordate le UNI EN ISO 8980 nelle quali sono definite le specifiche e le tolleranze che devono rispettare le lenti monofocali o multifocali [94] e le lenti progressive [95], le specifiche del fattore di trasmissione [96], dei trattamenti antiriflesso [97], dei trattamenti antigraffio [98] e dei relativi metodi di prova.

## ***VI.2 Lenti progressive progettate***

Allo stato attuale sono presenti sul commercio una quantità di design di lenti progressive notevolmente numerosa. Ciò nonostante questi possono essere classificati in alcune categorie che possono far riferimento all'impiego per il quale sono state concepite, a fattori estetici o alla geometria delle zone. Da questi punti di vista fare una prima classificazione in design hard e design soft (figura 108); i primi consentono zone per la visione da lontano e da vicino ampie a scapito della zona intermedia e delle zone di raccordo che presentano astigmatismi più elevati, mentre i secondi puntano l'attenzione sulla zona intermedia che risulta più ampia a scapito delle zone per la visione da lontano o da vicino.

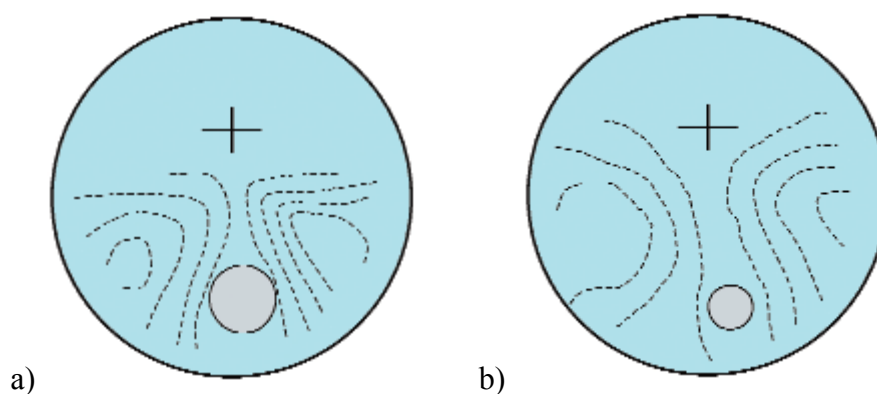
Le montature degli occhiali di recente produzione hanno una tendenza a diminuire l'altezza della lente; questo va ad influire sulla lunghezza del canale della lente progressiva che può essere classificato a seconda della sua lunghezza in lungo, medio, corto e cortissimo.

Un'altra classificazione può essere fatta, come si diceva, a seconda dell'impiego per il quale è destinata la lente; in questo caso vanno ricordate le lenti office, tipicamente impiegate



per il lavoro in ufficio che presentano una zona per il vicino molto ampia e una zona per il lontano di ampiezza ridotta; al contrario se viene privilegiata la zona per il lontano le lenti vengono tipicamente usate nella guida o nello sport.

Partendo da questi presupposti si è deciso di sviluppare un set di 5 lenti progressive che si differenziano essenzialmente per la lunghezza del canale e per l'ampiezza delle zone per la visione.



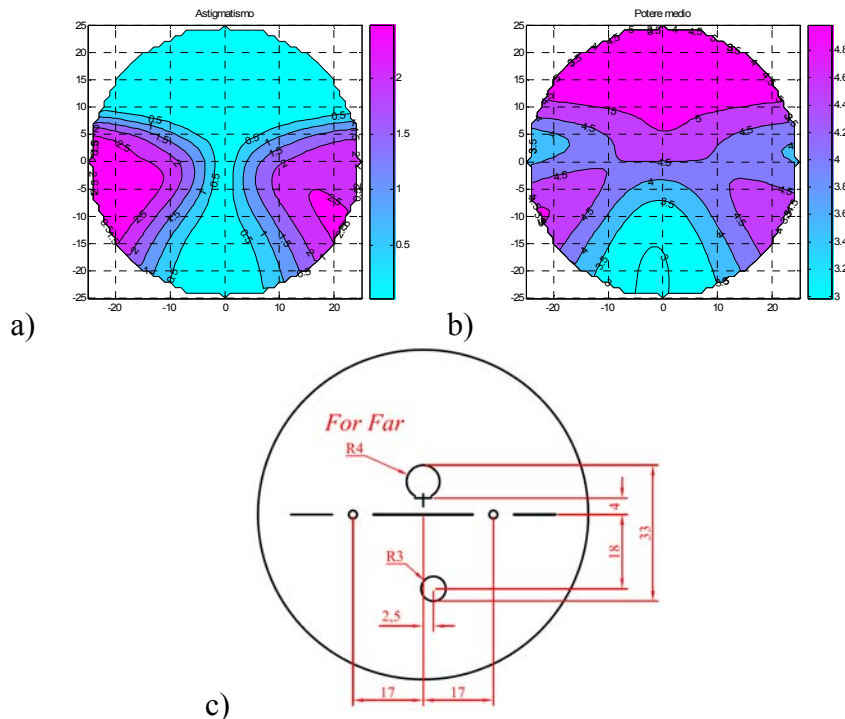
**Figura 108 Hard design (a) vs soft design (b)**

In figura 109 è rappresentato il design proposto per una lente progressiva molto comune che garantisce buone prestazioni in ogni condizione, ottimale per la guida, con una zona per il lontano molto ampia; il canale in questo caso risulta medio lungo e pari a 22 mm. La croce di centraggio, che serve per definire la posizione della pupilla, è posta a 4 mm dall'asse della lente, leggermente più bassa rispetto alle altre, per valorizzare la zona per la visione da lontano. In questo caso si consiglia un'altezza minima di montaggio pari a 33 mm

In figura 110 è rappresentato il design proposto per una lente progressiva da ufficio dove viene data maggiore importanza alla visione da vicino garantendo un'estensione elevata della medesima zona; la lunghezza del canale è pari a 20 mm. La croce di centraggio è posta a 9 mm dall'asse della lente, più alta rispetto alle altre, per valorizzare la zona per la visione da vicino. L'altezza di montaggio minima consigliata è pari a 30 mm.

In figura 111 si propone il design di una lente progressiva a canale corto, adatta per addizioni non molto elevate che garantisce la possibilità di essere montata su un occhiale dal design abbastanza stretto (altezza di montaggio pari a 30 mm) per andare incontro alle

tendenze della moda; la lunghezza del canale è pari a 18 mm e può essere classificato come corto. La croce di centraggio è posta 5 mm sopra all'asse della lente.

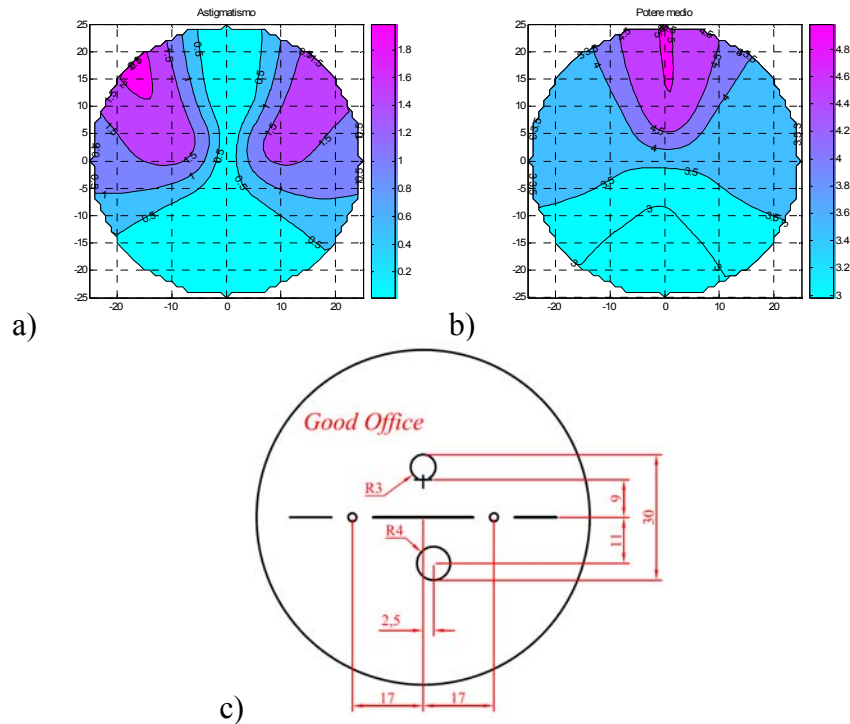


**Figura 109 Mappa dell'astigmatismo (a), del potere (b) e disposizione delle zone ottiche (c) per una lente con zona da lontano ampia.**

In figura 112 è illustrato il design di una lente progressiva a canale cortissimo, anche questa adatta per addizioni non molto elevate, che garantisce la possibilità di essere montata su un occhiale con montatura stretta (altezza di montaggio pari a 25 mm), garantendo inoltre spessori della lente molto sottili e conseguentemente una geometria più piacevole dal punto di vista estetico; la lunghezza del canale è pari a 14 mm. La croce di centraggio è posta 3 mm sopra all'asse della lente.

Infine in figura 113 viene proposto un design particolare di recente brevettazione che dà un'importanza particolare alla visione intermedia. Tale tipologia di lente è stata progettata per essere di impiego del tutto generale garantendo una visione ottimale anche nelle distanze intermedie, come nella visione a PC o nella lettura di spartiti. Tale lente presenta tre zone ottiche ben distinte, una per la visione da lontano, una per la visione da vicino e una per la visione intermedia. Il canale in questo caso risulta abbastanza lungo (24 mm) e la croce di

montaggio è posta a 6 mm dall'asse della lente in modo da garantire un buon bilanciamento delle zone per la visione durante le rotazioni dell'occhio. Il compromesso sta però nel fatto di avere un'altezza di montaggio di 36 mm che risulta essere abbastanza elevata.

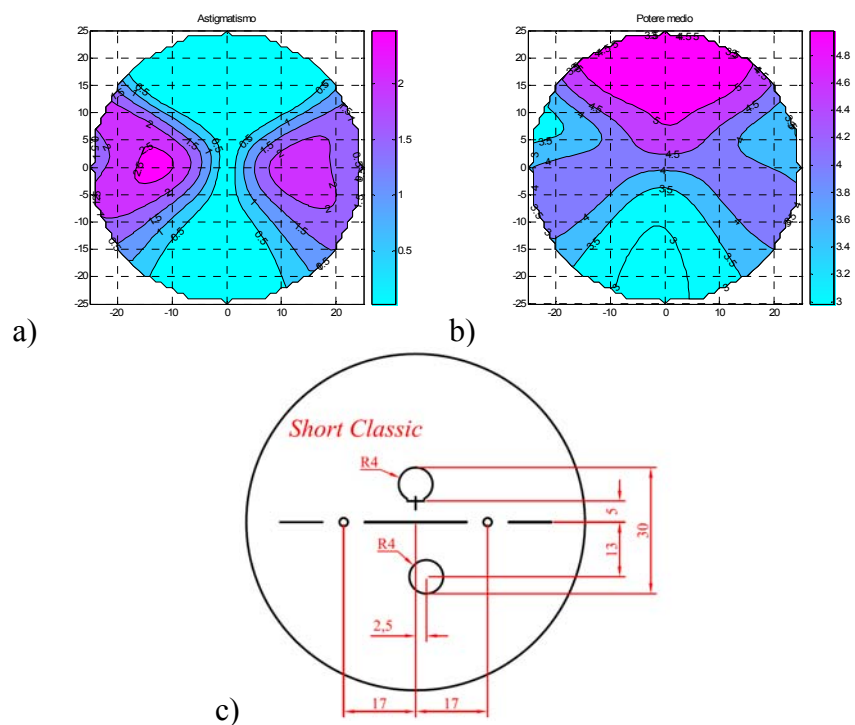


**Figura 110** Mappa dell'astigmatismo (a), del potere (b) e disposizione delle zone ottiche (c) per una lente office.

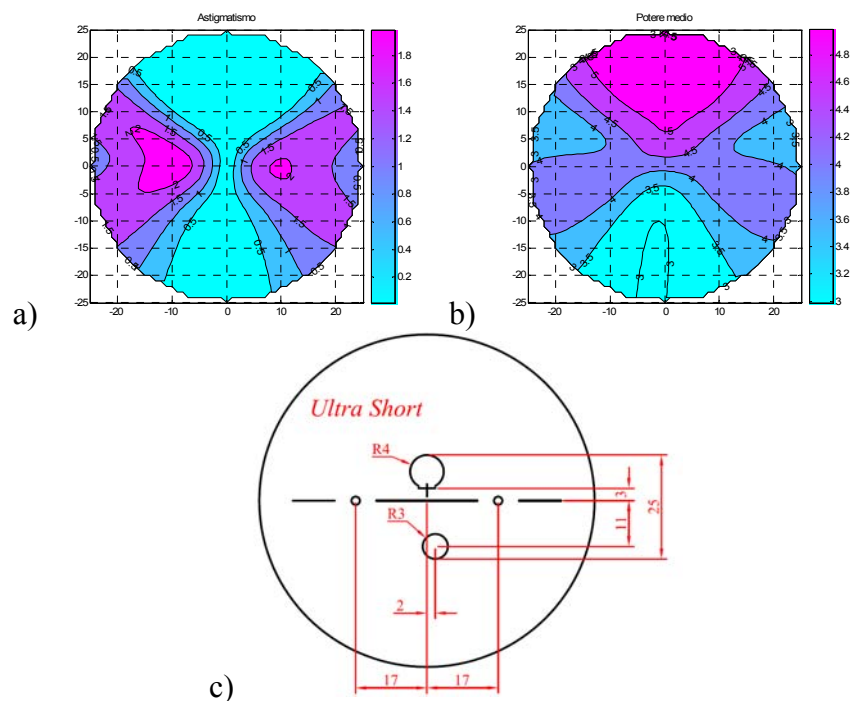
Le lenti proposte in questo conteso sono state pensate per ottenere un'addizione di 2.00 D (cioè la differenza tra il potere per la visione da vicino e il potere per la visione da lontano), impiegando:

- raggio di curvatura per il lontano: 100.0 mm (-5.00 D),
- raggio di curvatura per vicino: 166.7 mm (-3.00 D),
- indice di rifrazione  $n = 1.5$ .

In questa prima fase si sono trascurati i coefficienti di asfericità, anche se il software di modellazione è stato predisposto per il suo inserimento, per avere un'idea più chiara delle proprietà ottiche, prescindendo dall'effetto legato all'astigmatismo che nasce fuori asse.

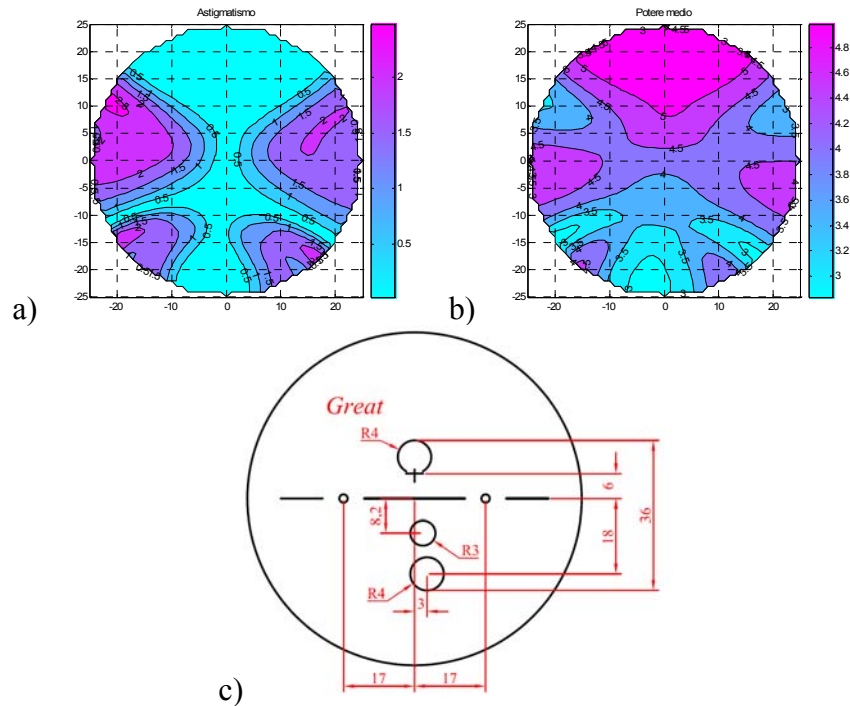


**Figura 111** Mappa dell'astigmatismo (a), del potere (b) e disposizione delle zone ottiche (c) per una lente a canale corto.



**Figura 112** Mappa dell'astigmatismo (a), del potere (b) e disposizione delle zone ottiche (c) per una lente a canale cortissimo.

Le mappe, riferite alla superficie posteriore dell'occhio ed analizzate con lo strumento di analisi di curvatura descritto nel paragrafo III.1, garantiscono un'elevata corrispondenza con quelle rilevate da strumenti ottici.



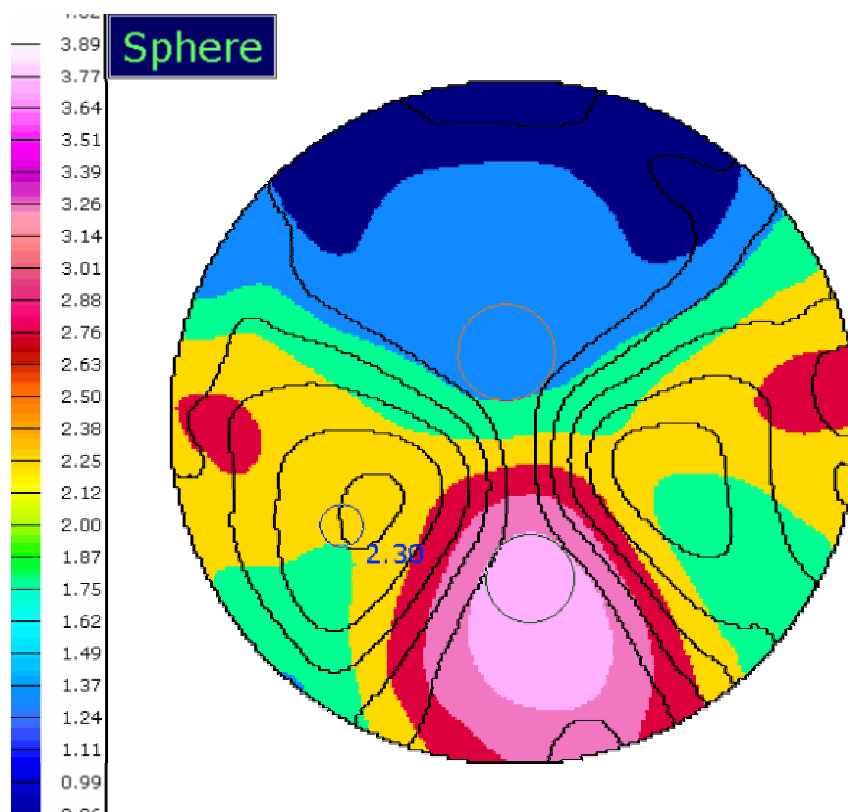
**Figura 113** Mappa dell'astigmatismo (a), del potere (b) e disposizione delle zone ottiche (c) per una lente che presta particolare attenzione alla zona per la visione intermedia, di recente brevettazione.

### **VI.3 Prototipi di lenti progressive**

Delle lenti progressive proposte, sono state attualmente realizzati due tipi di prototipi, uno basato sul design a canale corto e l'altro basato su design che premia la zona intermedia. Tali prototipi, in resina CR39, sono stati ottenuti da semifiniti realizzati con il processo di casting, che successivamente sono stati lavorati con operazioni ad asportazione di truciolo nella parte posteriore. Le lenti prodotte sono state misurate con il Class Pluss della Rotlex, strumento ottico basato sulla tecnologia brevettata della deflessione delle frange di Moire.

In figura 114 è riportata la mappa del potere con sovrapposta quella degli astigmatismi di una delle lenti sviluppate con canale corto, nella quale si può notare che entro i limiti di tolleranza prescritti dalla legge e pari a 0.12 D, la lente ottenuta rispetta la prescrizione

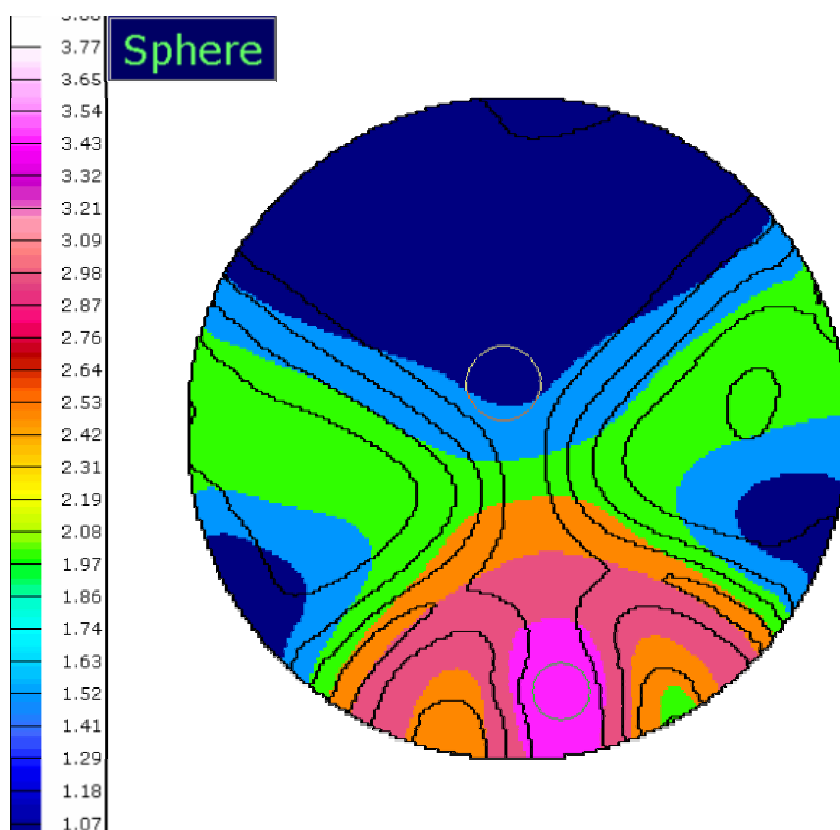
nominale usata in progettazione, pari a 1.50 D di potere per la zona da lontano e 2.50 D di addizione.



**Figura 114** Mappa del potere con sovrapposta la mappa degli astigmatismi per una lente di potere 1.52 D e addizione 2.41 D, basata sul design con canale corto.

Analogamente, come si può notare in figura 115 è riportata la mappa del potere con sovrapposta quella degli astigmatismi di una lente progressiva a tre zone dove viene dato un particolare risalto alla zona intermedia. Anche in questo caso è stato possibile verificare come i dati ottenuti rispecchiassero, entro le tolleranze imposte da normativa, i valori nominali impiegati in progettazione, pari a 1.50 D di potere per la zona da lontano e 2.50 D di addizione.

Le lenti realizzate sono attualmente in fase di presentazione da parte di un tecnico commerciale ad alcuni laboratori ottici e si attende da questi un riscontro sulla qualità delle lenti prodotte e su quali modifiche apportare ai modelli attualmente presentati per rendere la lente più performante e confortevole al portatore.



**Figura 115** Mappa del potere con sovrapposta la mappa degli astigmatismi per una lente di potere 1.48 D e addizione 2.43 D basata sul design con zona intermedia.





## Conclusioni

L'introduzione nel settore oftalmico di macchine a controllo numerico per le lavorazioni con asportazione di truciolo per geometrie a forma libera, ha causato la necessità di rivedere le metodologie e gli strumenti tradizionalmente impiegati nello sviluppo prodotto. Infatti tale tecnologia ha indotto a rivedere completamente le fasi di progettazione e di produzione delle lenti.

Con questo lavoro di ricerca e sviluppo, si sono andate ad indagare le principali problematiche insorte nella nuova concezione di sviluppo prodotto, sviluppando nelle varie fasi di progettazione e produzione di lenti oftalmiche, possibili soluzioni.

In particolare per quel che riguarda la fase di progettazione, si sono sviluppati due metodi per la modellazione geometrica di superfici di lenti progressive, il primo dei quali fa uso di un ambiente software commerciale per la modellazione di superfici, mentre il secondo si basa su un insieme di algoritmi numerici che forniscono come uscita la superficie definita come nuvola di punti. Sempre nella stessa fase sono stati sviluppati e validati due software per l'analisi ottico geometrica dei modelli sviluppati, il primo basato sull'analisi di curvatura e sulla successiva conversione in proprietà ottiche, il secondo basato su algoritmi di ray tracing che tengono in considerazione il sistema occhio lente e la loro disposizione reciproca. Grazie a questi strumenti è stato possibile dare una valutazione preliminare dei modelli geometrici proposti e di impiegare come strumento di modellazione quello basato su algoritmi numerici.

Nella fase di messa a punto del sistema produttivo si è provveduto allo sviluppo di un ambiente di integrazione CAD-CAM il quale, partendo dal modello geometrico della lente costituito da una mesh poliedrica o da una nuvola di punti, consente il calcolo e la simulazione dei cicli di lavorazione per le lavorazioni di rettifica e lucidatura. Inoltre si è provveduto ad una caratterizzazione dello stato superficiale ottenuto dalle lavorazioni ad asportazione di truciolo, attraverso strumenti come profilometro, rugosimetro ed AFM, andando a valutare l'influenza della cinematica e della rigidità delle macchine NC, dei parametri impiegati nei cicli di lavorazione, dei materiali lavorati e dei materiali degli utensili,

sugli errori micro e macrogeometrici commessi. Tale caratterizzazione ha consentito di fornire delle linee guida per la definizione dei parametri dei cicli di lavorazione.

Infine sono stati progettati alcuni modelli di lente progressiva, per due dei quali si è proceduto alla prototipazione. Dalle misurazioni effettuate sui prototipi si è potuto validare il metodo di progettazione e produzione proposto, in quanto i risultati delle medesime rispettano le caratteristiche ottiche nominali di progetto, entro i limiti proposti dalla normativa vigente.

## Appendice I

### Caratteristiche tecniche della strumentazione impiegata

#### *I.1 AFM*



**Figura 116 AFM Explorer TOPOMETRIX.**

Lo strumento è dotato di due tipi di scanner:

- Tripod 130  $\mu\text{m}$ : permette una scansione di 150  $\mu\text{m}$  x 150  $\mu\text{m}$  nel piano xy e di circa 10  $\mu\text{m}$  lungo l'asse z. La testa che viene montata, gestisce il solo movimento lungo l'asse z, mentre il movimento in x e y viene eseguito tramite altri due piezoelettrici installati nel corpo dello strumento a 90° l'uno rispetto all'altro. Il nome Tripod deriva appunto dalla presenza di tre piezoelettrici. La tensione di lavoro varia tra 0 e 100 V.

- Scanner 2.5  $\mu\text{m}$ : permette una scansione di 2.5  $\mu\text{m}$  x 2.5  $\mu\text{m}$  nel piano xy e di 0.8  $\mu\text{m}$  lungo l'asse z. E' costituito da un piezoelettrico di forma cilindrica diviso in quattro settori che permette di muovere la punta lungo x, y e z. La tensione di lavoro varia tra -220 e 220 V.

Per poter ridurre al minimo la sensibilità dell'AFM ai rumori ambientali ed alle vibrazioni causate da passi, passaggi d'automobili, voci, etc., si utilizza un tavolo a sospensione pneumatica, collegato, tramite un tubicino di plastica dura, ad un compressore.

## ***1.2 Rugosimetro – Profilometro***



**Figura 117 Zeiss TSK Surfcom Series - SURFCOM 1800D (costruttore: Tokyo Seimitsu Co)**

Software TIMS: TSK Integrated Measuring System, Versione 5.3

Funzioni di misura: Profilo di rugosità, ondulazione, profilo primario, errori di forma.

Rappresentazione dei profili primario di ondulazione, di rugosità e di profili acquisiti con profilometro; curve di abbott e spettro di potenza.

Valori di lunghezza di base: 0,008 – 0,25 – 0,8 – 0,25 – 2,5 – 8 – 25: lunghezza di valutazione da 1 a 10 lunghezze di base.

Filtri: gaussiano, DIN 4776, 2RC e 2RC a fase corretta

Parametri output: R, W, P, punti acquisiti.

Misure secondo gli standard: ISO 4287:1997, ISO 13565:1997, JIS B0601-1994, BS 1134/1-1988, ASME B46.1-1995, DIN 4771- 4774-4768/1-1990.

Output: profilo esportabile in formato file.NC o prn, salvataggio dati misurati in formato file .rst per i profili del rugosimetro, .cdt per i profili del profilometro

## **ASM 100 CNC**

Riportiamo in tabella le principali caratteristiche tecniche della rettifica ASM 100 CNC

Brief description of the machine	Generator with new kinematics
Area of application	Generator with new kinematics for processing Aspheres Cylinders Optical freeform surfaces
Performance data	<p>4-Axis CNC lens-generating operations (X, Y, Z, C)</p> <p>2 Tool spindles on which individual tools or combination tools can be mounted. Up to four tools can thus be used per cycle.</p> <p>Processing is done with wheel tools using the circumferential grinding method. This greatly improves the machine kinematics and gives highly reproducible results. Aspheres can be generated using a spiral tool path with only 2 CNC axes. As a result, the grinding results are much more accurate than those achievable with other methods.</p> <p>Rigid, low torsion machine construction on a molded mineral base</p> <p>State-of-the-art drive and spindle bearing technology. Spindles with multiple bearings.</p> <p>Siemens Sinumerik 840 Digital - state-of-the-art controller</p> <p>Windows user interface for easy programming. Interface to the optionally available software package AspheroTool® . Interface to modern profile measuring systems (e. g. the Taylor Hobson Talysurf PGI Series)</p>
Working range	<p>Diameter range: Ø 10-200 mm (using 2 grinding spindles with 4 tools)</p> <p>Diameter range: Ø 10 mm - 250 mm (using 1 grinding spindle with 2 tools)</p> <p>Radius range cx: 10 mm - ∞ (Best Fit Radius)</p> <p>Radius range cv: depends on the grinding tool used</p>



Figura 118 OptoTech Asphere Generator ASM 100 CNC TwinCut.

### 1.3 SPF 80 CNC

Riportiamo in tabella le principali caratteristiche tecniche della lucidatrice SPF 80 CNC

Brief description of the machine	Polishing Machine for freeform surfaces
Area of application	Polishing Machine is designed for polishing spherical toric aspheric backside progressive-addition surfaces of ophthalmic lenses
Working range	Diameter range: Ø 10-150 mm Radius range cx: 10 mm - ∞ (Best Fit Radius) Radius range cv: depends on the grinding tool used



Figura 119 OptoTech Polishing Machine SPF 80 CNC.

## 1.4 ASP 200 CNC

Riportiamo in tabella le principali caratteristiche tecniche della lucidatrice ASP 200 CNC

Brief description of the machine	Polishing machine for freeform surfaces
Area of application	Polishing machine for polishing Aspheres Cylinders Optical freeform surfaces
Performance data	4-axis- CNC polishing operations (X, Z, B, C)
<p>Polishing is done with ball-type tools or polishing wheels using the circumferential polishing method. This greatly improves the machine kinematics and gives highly reproducible results. Aspheres can be generated using a spiral tool path with only 2 CNC axes. As a result, the grinding results are much more accurate than those achievable with other methods. Alternatively, cylinders and freeform surfaces can be processed using the meandering method with rasters.</p>	

Rigid, low-torsion machine construction on a low-vibration cast iron basis.

State-of-the-art drive and spindle bearing technology. Spindles with multiple bearings.

Siemens Sinumerik 840 Digital - state-of-the-art CNC controller

Windows user interface for easy programming.  
Interface to the optionally available software package AspheroTool® . Interface to modern profile measuring systems (e. g. the Taylor HObson Talysurf PGI Series) and to other OptoTech generators and polishing machines

Working range

Diameter range: Ø 10-250 mm



**Figura 120 OptoTech Asphere Polishing Machine ASP 200 CNC.**



### ***1.5 Class Pluss***



**Figura 121 Rotlex Class Pluss**

Lo strumento consente di ottenere mappe del cilindro e del potere per ogni tipologia di lente oftalmica finita o semifinita, particolarmente utile per le lenti a potere progressivo.

Consente l'identificazione automatica del canale.

Esporta le mappe misurate in formato bitmap o ascii

Range di misura: -10D +10D.

Accuratezza: 0.03D.

Tempo di misura: 5 econdi.



## **Appendice II**

### **Elenco pubblicazioni e tesi seguite**

#### ***II.1 Pubblicazioni su rivista internazionale***

R. Meneghello, G. Concheri, G. Savio, D. Comelli: 'Surface and geometry error modeling in brittle mode grinding of ophthalmic lenses moulds' International Journal of Machine Tools and Manufacture, Volume 46, Issues 12-13, October 2006, Pages 1662-1670

#### ***II.2 Pubblicazioni su convegni internazionali***

G. Savio; R. Meneghello; G. Concheri: 'Fractal characterisation and modeling in fracture mode grinding of optical glass.' Atti del congresso internazionale congiunto ADM-INGEGRAF, Seviglia, 2005.

R. Meneghello; G. Concheri; G. Savio: 'Curvature error estimation in ground and polished surfaces of glass moulds.' Atti del congresso internazionale congiunto ADM-INGEGRAF, Seviglia, 2005.

G. Savio, R. Meneghello, G. Concheri: 'Curvature estimation for optical analysis.' Atti della conferenza internazionale EUSPEN, Baden, 2006.

G. Savio, G. Concheri, R. Meneghello. 'A cad-cam integration environment in the fabrication process of ophthalmic lenses.' Atti del congresso internazionale INGEGRAF, Barcellona, 2006.

G. Savio, G. Concheri, R. Meneghello: 'Simulazione delle proprietà ottiche e progettazione di lenti mediante tecniche di ray tracing.' Atti del congresso internazionale congiunto ADM-INGEGRAF, Perugia, 2007.

G. Savio, R. Meneghello, G. Concheri: 'A new model for surface roughness evolution in the Chemical Mechanical Polishing (CMP) process.' Atti della conferenza internazionale LAMDAMAP, Cardiff, 2007.

### ***II.3 Pubblicazioni su convegni nazionali***

R. Meneghello; G. Concheri; G. Savio: 'Applicazione di tecnologie cad-cam al processo di produzione di lenti oftalmiche: valutazione dello stato superficiale e della geometria nella rettifica di finitura.' Atti del congresso nazionale ADM, Bari, 2004.

### ***II.4 Pubblicazioni divulgative***

G. Savio, G. Battisti, G. Molesini, R. Meneghello, G. Concheri, D. Comelli, A. Noal, D. Camporese: 'Lenti ad alto comfort visivo: il ray tracing nell'ottica.' 2006. <http://www.ioda-it.com/pdf/tracing.pdf>

### ***II.5 Tesi seguite in veste di correlatore***

F. Campagolo. 'Analisi preliminare di rugosità di superfici funzionali mediante atomic force microscope.' DAUR - Laboratorio di Disegno e Metodi dell'Ingegneria Industriale - Università degli Studi di Padova, A.A. 2003-2004.

A. Sabbadin. 'Sviluppo e validazione di un applicativo software per l'analisi 3d della rugosità di superfici funzionali.' DAUR - Laboratorio di Disegno e Metodi dell'Ingegneria Industriale - Università degli Studi di Padova, A.A. 2003-2004.

L. De Antonia. 'Caratterizzazione micro- e macro-geometrica nel processo produttivo di stampi per lenti oftalmiche.' DAUR - Laboratorio di Disegno e Metodi dell'Ingegneria Industriale - Università degli Studi di Padova, A.A. 2003-2004.

G. Caporali. 'Approccio frattale alla caratterizzazione e simulazione dello stato superficiale di vetro rettificato mediante il metodo dello spettro di potenza.' DAUR - Laboratorio di Disegno e Metodi dell'Ingegneria Industriale - Università degli Studi di Padova, A.A. 2004-2005.

E. Calleri. 'Sviluppo di un ambiente integrato per la generazione e simulazione di percorsi utensile nelle lavorazioni CNC di vetro per lenti oftalmiche.' DAUR - Laboratorio di Disegno e Metodi dell'Ingegneria Industriale - Università degli Studi di Padova, A.A. 2004-2005.

D. Ferracini. 'Indagine sui materiali e metodologie produttive per la fabbricazione di lenti oftalmiche.' DAUR - Laboratorio di Disegno e Metodi dell'Ingegneria Industriale - Università degli Studi di Padova, A.A. 2004-2005.

S. Maddalosso. 'Valutazione della curvatura di profili e superfici discretizzate per l'analisi delle proprietà ottiche di lenti oftalmiche.' DAUR - Laboratorio di Disegno e Metodi dell'Ingegneria Industriale - Università degli Studi di Padova, A.A. 2004-2005.

D. Bozzetto. 'Sviluppo e validazione di un modello teorico-sperimentale nella lavorazione di lucidatura di vetro ottico.' DAUR-Laboratory of Design Methods and Tools in Industrial Engineering-University of Padova, A.A. 2004-2005.

G. Pedilarco. 'Sviluppo e applicazione di una procedura per la misurazione dello stato superficiale mediante microscopio a forza atomica (AFM).' DAUR - Laboratorio di Disegno e Metodi dell'Ingegneria Industriale - Università degli Studi di Padova, A.A. 2005-2006.

F. Bove. 'Stima della curvatura di superfici rappresentate da mesh poliedriche' DAUR - Laboratorio di Disegno e Metodi dell'Ingegneria Industriale - Università degli Studi di Padova, A.A. 2005-2006.

## Bibliografia

- [1] ISO 9004-1: 1994 *Gestione per la qualità ed elementi del sistema qualità. Guida generale.*
- [2] L. Kunwoo, *Principles of CAD/CAM/CAE systems*, Addison Wesley Longman Inc. United States of America, 1999.
- [3] F. Amirouche, *Principle of computer-aided design and manufacturing*, Pearson Prentice Hall, New Jersey, 2004.
- [4] T. C. Chang, R. A. Wysh, H. P. Wang, *Computer-Aided Manufacturing*, Pearson Prentice Hall, New Jersey, 2005.
- [5] H.H. Karow, *Fabrication Methods for Precision Optics*, John Wiley & Sons, New York, 1993.
- [6] P. Wilkinson: *Spectacle lens production: from casting to freeform generation*, Optometry Today, 2006.
- [7] M. Jalie, *Ophthalmic Lenses and Dispensing*, Butterworth Heinemann, Oxford, UK, 2003.
- [8] D. C. O'Shea, *Element Of Modern Optical Design*, Wiley Interscience publication, New York, 1985.
- [9] M. J. Kidger, *Fundamental optical design*, SPIE Press, Bellingham, Washington, 2002.
- [10] W. H. A. Fincham, M. H. Freeman, "Optics", Butterworths, London, 1980.
- [11] A. Canfora, C. Gadda, A. Zuin, V. Greco, G. Molesini, *Elementi di progettazione ottica. Quaderni di ottica e fotonica*, Centro editoriale toscano, 1999.
- [12] J. Arasa, J. Alda, *Real ray tracing*, Encyclopedia of Optical Engineering, Marcel Dekker, New York, 2004.
- [13] A.C. Guyton, *Trattato di Fisiologia medica*, Ed. Piccin, Padova, 1995.
- [14] J. Alonso, J. Alda, *Ophthalmic optics*, Encyclopedia of Optical Engineering, Marcel Dekker, New York, 2003.

- [15] M. Jalie, *The principles of the ophthalmic lenses*, The Association of British Dispensing Opticians, London, 1984.
- [16] M. Jalie, *Best form lenses Off-axis performance of lenses*, Optometry Today, 2005.
- [17] D. A. Atchison, *Spectacle lens design: a review*, Applied Optics, Vol. 31 No 19, pp. 3579-3585, 1992.
- [18] M. Jalie, *Aspheric lenses Thinner and lighter by design*, Optometry Today, 2005
- [19] D. A. Atchinson, G. Smith, M. Jalie, D. Gulley, *Spectacle lenses which correct oblique astigmatism at all ocular rotation: investigation of 'Merté's' conicoidal surfaces*, Ophthalmic Physiol Opt., Vol 16 No 5, pp.438-46, 1996.
- [20] D. J. Fischer, "Gradient-Index Ophthalmic Lens Design and Polymer Material Studies" The Institute of Optics, The College School of Engineering and Applied Sciences, University of Rochester, Phd dissertation, Rochester, New York, 2002.
- [21] G. Esser, H. Altheimer, H. Pfeiffer, W. Haimerl, *Single vision spectacle lens*, US patent No 6,752,497, 2004.
- [22] W. F. Long, *Optical design of ophthalmic lenses*, [http:// www.drdrbill.com/downloads/ optics/ ophth-optics/ Lens\\_Design.pdf](http://www.drdrbill.com/downloads/optics/ophth-optics/Lens_Design.pdf) ,1992.
- [23] J. Loss, G. Greiner, H.P. Seidel, *A variational approach to progressive lens design*, Computer aided design, Vol 30 No 8, pp. 595-602, 1998.
- [24] J. Wang, F. Santosa, *A numerical method for progressive lens design*, Mathematical Models and Methods in Applied Sciences, Vol 14 No 4, pp. 619-640, 2004.
- [25] M. E. Mortenson, *Modelli Geometrici in Computer Graphics*, McGraw-Hill, Milano, 1989.
- [26] B. Hamman, *Curvature Approximation for Triangulated Surfaces*, Computing Supplements, Vol 8, pp. 139 – 153, 1993.
- [27] P. Krsek, C. Lukács, R. R. Martin, *Algoritms for Computing Curvatures from Range Data*, The Mathematics of Surfaces Vol. 8, pp. 1-16, 1998.
- [28] E. M. Stokely, S. Y. Wu, *Surface Parameterization and Curvature Measurement of Arbitrary 3D-Objects: Five Practical Methods*, IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol 14 No 8, pp. 833-840, 1992.



- [29] I. Douros, B. Buxton, *Three-Dimensional Surface Curvature Estimation Using Quadric Surfaces Patches*, Scanning 2002 Proceeding, Paris, 2002.
- [30] A. McIvor, R. J. Valkenburg, *A comparison of Local Surface Geometry Estimation Methods*, Machine Vision and Application, Vol 10, pp. 17- 26 , 1997.
- [31] T. D. Gatzke, C. M. Grimm, *Assessing Curvature Metrics on Triangular Meshes*, Tecnical Report, Washington University, St. Louis, Missouri, 2003.
- [32] M. Desbrun, M. Meyer, P. Alliez, *Intrinsic parameterizations of Surface Meshes*, Eurographics 2002, Vol 21, No 2, 2002.
- [33] A. Sheffer, E. de Sturler, *Smoothing an Overlay Grid to Minimize Linear Distortion in Texture Mapping*, ACM Transactions on Graphics, Vol 21 No 4, pp. 874-890, 2002.
- [34] J. Goldfeather, V. Interrante, *A Novel Cubic-Order Algorithm for Approximating Principal Direction Vectors*, ACM Transactions on Graphics, Vol 23 No 1, pp. 45-63, 2004.
- [35] S. M. Naik, R. C. Jain, *Spline-Based Surface Fitting on Range Images for CAD Applications*, Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, pp. 249-253, 1998.
- [36] A. Razdan, M. Bae, *Curvature Estimation Scheme for Triangle Meshes Using Biquadratic Bézier Patches*, Computer-Aided Design, Vol 37 No 14, pp. 1481-1491, 2005.
- [37] S. J. Kim, C. H. Kim, D. Levin, *Surface Simplification Using Discrete Curvature Norm*, The Third Israele-Korea Bineational Conference on Geometric Modeling and Computer Graphics, Seul, Korea, 2001.
- [38] D. S. Meek, D. J. Walton, *On Surface Normal and Gaussian Curvature Approximations Given Data Sampled from a Smooth Surface*, Computer Aided Geometric Design, Vol 17 No 6, pp. 521-543, 2000.
- [39] M. DoCarmo, *Differential Geometry of Curves and Surfaces*, Prentice-Hall, New York, 1976.
- [40] D. Struik, *Lectures on Classical Differential Geometry*, Addison-Wesley Series in Mathematics, 1961.

- [41] D. S. Meek, D. J. Walton, *On Surface Normal and Gaussian Curvature Approximations Given Data Sampled from a Smooth Surface*, Computer Aided Geometric Design, Vol 17 No 6, 521-543, 2000.
- [42] N. Dyn, K. Hormann, S. Kim, D. Levin, *Optimizing 3D Triangulations Using Discrete Curvature Analysis*, Vanderbilt Univ. Press Innovations In Applied Mathematics Series, Oslo, pp. 135-146, 2000.
- [43] X. Chen, F. Schmitt, *Intrinsic Surface Properties from Surface Triangulation*, The Second European Conference on Computer Vision, pp. 739-743, 1992.
- [44] R. R. Martin, *Estimation of Principal Curvatures from Range Data*, International Journal of Shape Modeling, Vol 4, pp. 99-104, 1998.
- [45] G. Taubin, *Estimation the Tensor of Curvature of a Surface from a Polyhedral Approximation*, The Fifth International Conference on Computer Vision, pp. 902-907, 1995.
- [46] E. Hameiri, I. Shimshoni, *Estimating the Principal Curvatures and the Darboux Frame from Real 3D Range Data*, IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, Vol. 33 No 4, pp. 626-637, 2003.
- [47] T. Surazhsky, E. Magid, O. Soldea, G. Elber, E. Rivlin, *A comparison of Gaussian and mean curvature estimation methods on triangular meshes of range image data*, Computer Vision and Image Understanding, Vol 107 No 3, pp. 139-159, 2007.
- [48] C. K. Tang, G. Medioni, *Curvature-Augmented Tensor Voting for Shape Inference from noisy 3D Data*, IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol 24 No 6, pp. 858- 864, 2002.
- [49] W. S. Tong, C. K. Tang, *Robust Estimation of Adaptive Tensor of Curvature by Tensor Voting*, IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol 27 No 3, pp. 434-449, 2005.
- [50] D. L. Page, Y. Sun, J. Paik, M. A. Abidi, *Normal Vector Voting: Crease Detection and Curvature Estimation on Large, Noisy Meshes*, Graphical Models, Vol 64, 199-229, 2002.
- [51] S. Maddalosso, *Valutazione della curvatura di profili e superfici discretizzate per l'analisi delle proprietà ottiche di lenti oftalmiche*, Tesi di laurea, DAUR -

- Laboratorio di Disegno e Metodi dell'Ingegneria Industriale - Università degli Studi di Padova, A.A. 2004-2005.
- [52] F. Bove, *Stima della curvatura di superfici rappresentate da mesh poliedriche*, Tesi di laurea, DAUR - Laboratorio di Disegno e Metodi dell'Ingegneria Industriale - Università degli Studi di Padova, A.A. 2005-2006.
  - [53] G. Savio, G. Concheri, R. Meneghello, *A cad-cam integration environment in the fabrication process of ophthalmic lenses*, Atti del Congresso Internazionale Ingegraf, 2006.
  - [54] E. Angel, *Computer Graphics*, Addison-Wesley Publishing Company, USA, 1990.
  - [55] T. Möller, B. Trumbore, *Fast minimum storage Ray/Triangle Intersection*. Journal of graphics tools, Vol 2 No 1, pp. 21-28, 1997.
  - [56] D. Badouel, *An efficient Ray-Polygon Intersection*, Graphics Gems I, Andrew Glassner, Academic Press, 1990.
  - [57] D. Sunday, *Intersections of Rays, Segments, Planes and Triangles in 3D* [http://geometryalgorithms.com/Archive/algorithm\\_0105/algorithm\\_0105.htm](http://geometryalgorithms.com/Archive/algorithm_0105/algorithm_0105.htm).
  - [58] R. Meneghello, G. Concheri, G. Savio, D. Comelli, *Surface and geometry error modeling in brittle mode grinding of ophthalmic lenses moulds*, International Journal of Machine Tools & Manufacture, Vol 46, pp. 1662-1670, 2006.
  - [59] Yi Li, P.D. Funkenbusch, S.M. Gracewski, J. Ruckman, *Tool wear and profile development in contour grinding of optical components*, International Journal of Machine Tools and Manufacture, Vol 44 No 4, pp. 427-438, 2004.
  - [60] I. Zeid, *CAD/CAM Theory and Practice*, McGraw-Hill, New York, 1991.
  - [61] C. F. Cheung, W. B. Lee, *A framework of a virtual machining and inspection system for diamond turning of precision optics*, Journal of Materials Processing Technology, Vol 119, 20, Pp. 27-40, 2001
  - [62] A. Noal, *Procedimenti innovativi per la fabbricazione di lenti oftalmiche: ottimizzazione preliminare del processo CAD-CAM*, Tesi di laurea, DAUR - Laboratorio di Disegno e Metodi dell'Ingegneria Industriale - Università degli Studi di Padova, A.A. 2002-2003.

- [63] L. Comiotto, *Procedimenti innovativi per la fabbricazione di lenti oftalmiche: modellazione e ottimizzazione preliminare del processo di lucidatura di stampi asferici*, Tesi di laurea, DAUR - Laboratorio di Disegno e Metodi dell'Ingegneria Industriale - Università degli Studi di Padova, A.A. 2002-2003.
- [64] G. Savio, *Valutazione della geometria e dello stato superficiale per l'ottimizzazione del processo di fabbricazione di lenti oftalmiche*, Tesi di laurea, DAUR - Laboratorio di Disegno e Metodi dell'Ingegneria Industriale - Università degli Studi di Padova, A.A. 2002-2003.
- [65] L. De Antonia, *Caratterizzazione micro- e macro-geometrica nel processo produttivo di stampi per lenti oftalmiche*, Tesi di laurea, DAUR - Laboratorio di Disegno e Metodi dell'Ingegneria Industriale - Università degli Studi di Padova, A.A. 2003-2004.
- [66] E. Calleri, *Sviluppo di un ambiente integrato per la generazione e simulazione di percorsi utensile nelle lavorazioni CNC di vetro per lenti oftalmiche*, Tesi di laurea, DAUR - Laboratorio di Disegno e Metodi dell'Ingegneria Industriale - Università degli Studi di Padova, A.A. 2004-2005.
- [67] M. De Berg, M. Van Kreveld, M. Overmars, O. Schwarzkopf, *Computational Geometry Algorithms and Applications*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Germany, 1997.
- [68] Z. Zhong, *Surface finish of precision machined advanced materials*, Journal of Materials Processing Technology, Vol 122, pp. 173-178, 2002.
- [69] J.P. Marioge, *Les méthodes de fabrication de surfaces asphériques (I)*, Journal of Optics, Vol 15 No 3, pp. 119-132, Paris, 1984.
- [70] J.P. Marioge, *Les méthodes de fabrication de surfaces asphériques (II)*, Journal of Optics, Vol 15 No 4, pp. 183-204, Paris, 1984.
- [71] F.W. Preston, *The theory and design of plate glass polishing machines*, Journal of the Society of Glass Technology, Vol 11, pp. 214-256, 1927.
- [72] F.W. Preston: *The theory and design of plate glass polishing machines Part II*, Journal of the Society of Glass Technology, Vol 13, pp. 111-123, 1929.

- [73] T. Takahashi, P.D. Funkenbusch, *Micromechanics of diamond composite tools during grinding of glass*, Materials Science and Engineering A, Vol 285, pp. 69-79, 2000.
- [74] N.S. Ong, V.C. Venkatesh, *Semi-ductile grinding and polishing of Pyrex glass*, Journal of Materials Processing Technology, Vol 83, pp. 261-266, 1998.
- [75] V. Cossalter, *Meccanica applicata alle macchine*, Edizioni Progetto, Padova, 1996.
- [76] Y. Li, S.M. Gracewski, P.D. Funkenbusch, J. Ruckman, *Analysis of chatter in contour grinding of optical materials*, International Journal of Machine Tools and Manufacture, Vol 42 No 10, pp. 1095-1103, 2002.
- [77] R.F. Van Ligten, V.C. Venkatesh, *Diamond grinding of aspheric surfaces on a CNC 4-axis machining centre*, Annals of the CIRP, Vol 31No 1, pp. 295-298, 1985.
- [78] Z. Zhong, V.C. Venkatesh: Semi ductile grinding and polishing of ophthalmic and aspherics and spherics, Annals of the CIRP, 44(1), 1995, pp. 339-342.
- [79] V.C. Venkatesh, S. Izman, S. Sharif, T.T. Mon, M. Konneh, *Ductile streaks in precision grinding of hard and brittle materials*, Sadhana - Academy Proceedings in Engineering Sciences, Vol 28 No 5, pp. 915-924, 2003.
- [80] C. J. Evans, E. Paul, D. Dornfeld, D.A. Lucca, G. Byrne, M. Tricard, F. Klocke, O. Dambon, B. A. Mullany, *Material Removal Mechanisms in Lapping and Polishing*, Annals of the CIRP, Vol 52 No. 2, 611-633, 2003.
- [81] UNI EN ISO 3274: 1998 *Specifiche geometriche dei prodotti (GPS) - Stato della superficie: Metodo del profilo - Caratteristiche nominali degli strumenti a contatto (tastatore).*
- [82] UNI EN ISO 4287: 2002 *Specifiche geometriche dei prodotti (GPS) - Stato della superficie: Metodo del profilo - Termini, definizioni e parametri dello stato della superficie.*
- [83] UNI EN ISO 11562:1998 *Specifiche geometriche dei prodotti (GPS) - Stato della superficie: Metodo del profilo - Caratteristiche metrologiche dei filtri a fase corretta.*
- [84] UNI EN ISO 4288:2000 *Specifiche geometriche dei prodotti (GPS) - Stato della superficie: Metodo del profilo - Regole e procedure per il rilevamento dello stato della superficie.*

- [85] B.E. Gillman, S.D. Jacobs, *Bound-abrasive polishers for optical glass*, Applied Optics, Vol 37, pp. 3498-3505, 1998.
- [86] V.C. Venkatesh, Z. Zhong, E. Wihardjo, *Studies on polishing of glass moulds after lapping with hard and soft pellets*, Journal of Materials Processing Technology, Vol 62, pp. 415-420, 1996.
- [87] V.C. Venkatesh, *Precision manufacture of spherical and aspherical surfaces on plastic, glass, silicon and germanium*, Current Science, Vol 84 No 9, pp. 1211-1219, 2003.
- [88] L.M. Cook, *Chemical processes in glass polishing*, Journal of Non-Crystalline Solids, Vol 120, pp. 152-171, 1990.
- [89] T. Yu, C. Yu, M. Orlowski, *A statistical polishing pad model for chemical-mechanical polishing*, IEEE International Electron Devices Meetings, pp. 865-868, 1993.
- [90] V.C. Venkatesh, I. Inasaki, H.K. Toenshof, T. Nakagawa, I.D. Marinescu, *Observation on polishing and ultraprecision machining of semiconductor substrate materials*, Annals of the CIRP, Vol 44 No 2, 611-618, 1995.
- [91] H. Hertz, *Gesammelte Werke*, Vol. 1, pp 174-196, Leipzig, 1895.
- [92] G. Savio, R. Meneghello, G. Concheri, *Fractal characterisation and modeling in fracture mode grinding of optical glass*, XVII INGEGRAF – XV ADM International congress Sevilla, 2005.
- [93] ISO/DIS 25178-2: 2007 *Geometrical product specifications (GPS) - Surface texture: Areal - Part 2: Terms, definitions and surface texture parameters*.
- [94] UNI EN ISO 8980-1: 2004 *Ottica oftalmica - Lenti per occhiali finite non tagliate - Parte 1: Specifiche per lenti monofocali e multifocali*.
- [95] UNI EN ISO 8980-2: 2004 *Ottica oftalmica - Lenti per occhiali finite non tagliate - Parte 2: Specifiche per lenti a potere progressivo*.
- [96] UNI EN ISO 8980-3: 2005 *Ottica oftalmica - Lenti per occhiali finite non tagliate - Parte 3: Specifiche del fattore di trasmissione e metodi di prova*.
- [97] UNI EN ISO 8980-4: 2006 *Ottica oftalmica - Lenti per occhiali finite non tagliate - Parte 4: Specifiche e metodi di prova per trattamenti antiriflesso*.

- [98] UNI EN ISO 8980-5: 2005 *Ottica oftalmica - Lenti per occhiali finite non tagliate - Parte 5: Requisiti minimi per le superfici delle lenti per occhiali dichiarate come resistenti all'abrasione.*
- [99] UNI EN ISO 10322-1: 2006 *Ottica oftalmica - Lenti semi-finite per occhiali - Parte 1: Specifiche per lenti mono-focali e multi-focali.*
- [100] UNI EN ISO 10322-2: 2006 *Ottica oftalmica - Lenti semi-finite per occhiali - Parte 2: Specifiche per lenti a potere progressivo.*
- [101] UNI EN ISO 13666: 2002 *Ottica oftalmica - Lenti per occhiali – Vocabolario.*
- [102] UNI EN ISO 14889: 2004 *Ottica oftalmica - Lenti per occhiali - Requisiti fondamentali relativi a lenti finite non tagliate.*